

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SETOR DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA FLORESTAL

BARBARA TALAMINI VILLAS-BÔAS

**UTILIZAÇÃO DE CIMENTO PORTLAND E RESÍDUOS DE *Pinus* spp PARA
FABRICAÇÃO DE BLOCOS VAZADOS DE BAIXA DENSIDADE PARA
ALVENARIA**

CURITIBA
2016

BARBARA TALAMINI VILLAS-BÔAS

**UTILIZAÇÃO DE CIMENTO PORTLAND E RESÍDUOS DE *Pinus* spp PARA
FABRICAÇÃO DE BLOCOS VAZADOS DE BAIXA DENSIDADE PARA
ALVENARIA**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Florestal.

Orientador: Setsuo Iwakiri
Coorientadores: Carlos Frederico Alice Parchen e
José Guilherme Prata

CURITIBA

2016

Ficha catalográfica elaborada pela
Biblioteca de Ciências Florestais e da Madeira - UFPR

Villas-Bôas, Barbara Talamini

Utilização de cimento Portland e resíduos de *Pinus* spp para fabricação de blocos vazados de baixa densidade para alvenaria / Barbara Talamini Villas-Bôas. – Curitiba, 2016.

187 f. : il.

Orientador: Prof. Dr. Setsuo Iwakiri

Coorientadores: Prof. Dr. Carlos Frederico Alice Parchen

Prof. Dr. José Guilherme Prata

Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal. Defesa: Curitiba, 10/03/2016.

Área de concentração: Tecnologia e Utilização de Produtos Florestais.

1. Resíduos vegetais. 2. Cimento portland. 3. Blocos de concreto. 4. Desenvolvimento sustentável. 5. Teses. I. Iwakiri, Setsuo. II. Parchen, Carlos Frederico Alice. III. Prata, José Guilherme. IV. Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências Agrárias. V. Título.

CDD – 634.9

CDU – 634.0.839

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em ENGENHARIA FLORESTAL da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da Tese de Doutorado de **BARBARA TALAMINI VILLAS BÔAS**, intitulada: **"UTILIZAÇÃO DE CIMENTO PORTLAND E RESÍDUOS DE Pinus spp PARA FABRICAÇÃO DE BLOCOS VAZADOS DE BAIXA DENSIDADE PARA ALVENARIA"**, após terem inquirido a aluna e realizado a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua aprovação.

Curitiba, 10 de Março de 2016.


Prof SETSUO IWAKIRI (UFPR)
(Presidente da Banca Examinadora)


Prof ADALBERTO MATOSKI (UFPR)


Prof ADAUTO JOSÉ MIRANDA DE LIMA (UFPR)


Prof CARLOS FREDERICO ALICE PARCHEN (UFPR)


Prof MARIENNE DO ROCIO DE MELLO MARON DA COSTA (UFPR)



À minha família, parte mais importante de
minha vida.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela vida e pela oportunidade de sempre evoluir.

Aos professores Setsuo Iwakiri e Carlos Frederico Alice Parchen, por todo o ensinamento e confiança, mesmo antes do ingresso no programa.

Ao professor José Guilherme Prata, por aceitar meu pedido de coorientação.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal da Universidade Federal do Paraná, pelo conhecimento transmitido.

Aos amigos Vinicius Castro, Rafael Braz e Rafael Azambuja, que formaram a base para meu aprendizado.

Aos colegas do programa, que me ensinaram um pouco do mundo da engenharia florestal.

A Daiane e Mari, pela ajuda nos bastidores.

Aos amigos do Laboratório de Engenharia Florestal e do Laboratório de Materiais e Estruturas.

Ao professor Aduino José Miranda Lima, pelas dicas trocadas por *e-mail*.

Ao professor Saulo Güths, que, mesmo distante, me ajudou muito.

Ao amigo Agnelo Ribas, da Diprotec e a Madeireira Maracanã, por cederem o material para estudo.

Ao engenheiro Mario Myasava, da Cesbe S.A., pelos ensinamentos mecânicos.

A todos da Bricka Sistemas Construtivos, pelo tempo, ensinamentos e disposição.

A Adriana, Suzi e Karla, por todas as correções, sugestões e ensinamentos.

Aos meus pais, especialmente a minha mãe Margaret que sempre esteve presente em todos os meus estudos.

A todos os meus familiares, filhos pela paciência e em especial a André Luiz Villas Bôas, sem ele, nada teria começado.

Àqueles que infelizmente esqueci de listar, não por serem menos importantes, meu muito obrigada.

Ninguém é tão grande que não possa aprender, nem tão pequeno que não possa ensinar.

Voltaire

RESUMO

Uma crescente preocupação com o desenvolvimento sustentável em todos os setores da sociedade tem se intensificado nos últimos anos, inclusive no ramo da construção civil. Para incorporar esse importante conceito em seus processos produtivos, o mercado da construção precisa buscar novas matérias-primas ecologicamente corretas. Seguindo esta tendência o presente trabalho teve como objetivos a caracterização de compósitos de madeira-cimento e a produção de blocos de baixa densidade para alvenaria, produzidos exclusivamente a partir da mistura de cimento Portland e partículas de resíduos de madeira de *Pinus* spp oriundos de sobejo de madeira. Durante os estudos foram produzidos três traços de Ca(OH)_2 , alterando a quantidade de água para sua produção, que foram utilizados no pré tratamento das partículas. Verificou-se que o traço de Ca(OH)_2 produzido com a relação de água:cal de 6,25:1 resulta em compósitos com maiores valores de resistência à compressão axial. Foram estudadas, ainda, cinco dimensões de partículas de *Pinus* spp, (retidas nas peneiras 2,36 mm, 4,75 mm, 6,30 mm e misturas de partículas moídas 1 e 2 vezes) e duas velocidades de vibração para conformação dos corpos de prova em mesa vibratória (220 N e 440 N). Observou-se que as partículas passantes na peneira 4,75mm e retidas na peneira com malha 2,36 mm são ideais para a produção dos compósitos e que os corpos de prova produzidos na mesa vibratória de 220 N resultam em uma mistura mais homogênea. Foram, também, investigadas a introdução do adição mineral com sílica da casca de arroz e de superplastificante nos compósitos, onde os resultados da resistência à compressão axial indicaram que a utilização dos mesmos não produziu resultado. Foi variado a adição de água na mistura (20% e 30%) e relações de madeira:cimento que variaram entre 1:1,5 e 1:2,2, os resultados recomendam o uso de 30% de adição de água e relação madeira:cimento de 1:1,5. Por fim, foram produzidos três traços de blocos vazados de madeira-cimento, utilizando-se Cimento Portland tipo CP-II Z e CP-V ARI, nos traços de madeira:cimento de 1:1,5 e 1:2,2. Constatou-se que os blocos produzidos possuem baixa densidade podendo trazer alívio de cargas nas fundações, e facilitando o transporte interno na obra, e apresentaram características de isolamento térmico superiores às de materiais cimentícios convencionais.

Palavras-chave: Compósitos de Madeira-cimento. Resíduos. Blocos Vazados de baixa densidade. Desenvolvimento Sustentável.

ABSTRACT

A growing concern for sustainable development in all sectors of society is remarkable, even in the construction industry. To incorporate this important concept in its production processes, the construction market needs to find new environmentally friendly raw materials. The aim of this work was to characterize wood-cement composites and develop low density masonry blocks produced exclusively from Portland cement and *Pinus* spp wood waste particles. The research studied three $\text{Ca}(\text{OH})_2$ mixes were produced, alternating the water amount. It was found that the water:calcium oxide ratio of 6.25:1 results in composites with higher axial compression strength values. Five *Pinus* spp particles sizes have been studied (retained in the sieves 2.36mm, 4.75mm, 6.30mm and mixtures of particles ground once and twice) as well as two vibration speeds for shaping molds conformation in vibrating table (220N and 440N). It was noticed that the particles retained on the sieve with mesh 2.36 mm are ideal for the composites production and composites produced with vibrating table 220 N results in a more homogeneous mixture. The addition of rice hull mineral silica and superplasticizer in the composites, where also tested, but the compressive strength results indicated that the use of such additives is not necessary. It was evaluated the amount of water in the mixture (20% and 30%) and wood:cement relations (between 1:1,5 and 1:2,2) studies were also performed. It is recommended the use of 30% added water and wood:cement ratio of 1:1.5. Finally, three hollow wood-concrete blocks were produced using Portland cement type CP-II Z and CP-V ARI, using wood:cement mix ratio of 1:1.5 and 1:2.2. It was noticed that these blocks have low density can bring relief loads on the foundation, and facilitating internal transport in the construction site, and had thermal insulation characteristics exhibited superior to conventional cement materials.

Keywords: Wood-cement composites. Wood waste. Low density concrete blocks. Sustainable development

LISTA DE FIGURAS

| | | |
|-----------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| FIGURA 01 | FLUXOGRAMA DOS ESTUDOS REALIZADOS DO CAPÍTULO 3 AO 8 | 22 |
| FIGURA 02 | ESQUEMA SIMPLIFICADO DO DISPOSITIVO DE MEDIÇÃO DA CONDUTIVIDADE TÉRMICA..... | 48 |
| FIGURA 03 | PRINCIPAIS PARTES DE UMA VIBROPRENSA | 53 |
| FIGURA 04 | SEQUÊNCIA DE FUNCIONAMENTO DE UMA VIBROPRENSA | 58 |
| FIGURA 05 | BLOCO VAZADO DE CONCRETO SIMPLES | 62 |
| FIGURA 06 | ENSAIO DE COMPRESSÃO AXIAL | 65 |
| FIGURA 07 | ANÁLISE DIMENSIONAL DE BLOCOS..... | 66 |
| FIGURA 08 | ENSAIO DE DETERMINAÇÃO DA ÁREA LÍQUIDA | 68 |
| FIGURA 09 | SECAGEM DOS CAVACOS PROVENIENTES DA MADEIREIRA | 71 |
| FIGURA 10 | PENEIRAS UTILIZADAS NA SAÍDA DA AÇÃO DE MOAGEM PARA LIMITAR O TAMANHO FINAL DAS PARTÍCULAS | 71 |
| FIGURA 11 | PARTÍCULAS PROVENIENTES DE REDUÇÃO EM MOINHO DE MARTELO. T1 – MATERIAL MOÍDO UMA VEZ E T2 – MATERIAL MOÍDO DUAS VEZES..... | 72 |
| FIGURA 12 | FOTO A – REALIZAÇÃO DO PENEIRAMENTO PARA CARACTERIZAÇÃO DAS FAIXAS GRANULOMÉTRICAS. FOTO B – PARTE DO MATERIAL RETIDO NA PENEIRA 2,36 MM DURANTE O PROCESSO DE CARACTERIZAÇÃO GRANULOMÉTRICA..... | 73 |
| FIGURA 13 | COMPARATIVO DA CURVA GRANULOMÉTRICA DO MATERIAL T1, T2 E AGREGADO GRAÚDO SEGUNDO NBR 7211 (ABNT, 2009b) | 74 |
| FIGURA 14 | COMPARAÇÃO DO TAMANHO DAS PARTÍCULAS APÓS PENEIRAMENTO..... | 75 |
| FIGURA 15 | PARTÍCULAS UTILIZADAS PARA PRODUÇÃO DOS CORPOS DE PROVA..... | 81 |
| FIGURA 16 | FOTO E ESQUEMA DO VIBRADOR UTILIZADO NA MESA VIBRATÓRIA DE 220 N | 82 |
| FIGURA 17 | MOLDE CILÍNDRICO DE PVC, COM 70 MM DE DIÂMETRO..... | 83 |
| FIGURA 18 | PARTÍCULAS SEM PRÉ-TRATAMENTO (ESQ), PARTÍCULAS COM SUPERFÍCIE CARBONATADA (DIR)..... | 85 |
| FIGURA 19 | MOLDES CILÍNDRICOS EM PVC PREENCHIDOS PELO COMPOSITO MADEIRA-CIMENTO TAMPADO POR PEÇA CIRCULAR EM MDF E FECHADO LATERALMENTE POR CINTAS PLÁSTICAS..... | 87 |
| FIGURA 20 | FOTO DOS CORPOS DE PROVA DESENFORMADOS APÓS 28 DIAS DE CURA | 88 |

| | | |
|-----------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| FIGURA 21 | ENSAIO DE COMPRESSÃO AXIAL NOS CORPOS DE PROVA APÓS 28 DIAS DE CURA, CONFORME NBR 5739..... | 88 |
| FIGURA 22 | VALORES MÉDIOS DAS DENSIDADES APARENTES DOS CORPOS DE PROVA DOS COMPÓSITOS SEPARADO POR DIMENSÃO DAS PARTÍCULAS E GRUPOS DE RELAÇÃO ÁGUA:CAL | 92 |
| FIGURA 23 | VALORES MÉDIOS DAS DENSIDADES APARENTES DOS CORPOS DE PROVA DOS COMPÓSITOS SEPARADOS POR GRUPOS DE RELAÇÃO ÁGUA:CAL..... | 93 |
| FIGURA 24 | VALORES MÉDIOS PARA A RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL DOS CORPOS DE PROVA DOS COMPÓSITOS DE MADEIRA-CIMENTO, POR DIMENSÃO DAS PARTÍCULAS E GRUPOS DE RELAÇÃO ÁGUA:CAL..... | 93 |
| FIGURA 25 | VALORES MÉDIOS PARA A RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL DOS CORPOS DE PROVA DOS COMPÓSITOS DE MADEIRA-CIMENTO, POR GRUPOS DE RELAÇÃO ÁGUA:CAL | 94 |
| FIGURA 26 | VALORES MÉDIOS PARA A PROPRIEDADE MECÂNICA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL DOS CORPOS DE PROVA DOS COMPÓSITOS DE MADEIRA-CIMENTO PARA OS TRÊS GRUPOS DE RELAÇÃO ÁGUA:CAL | 95 |
| FIGURA 27 | MESA VIBRATÓRIA DESENVOLVIDA PELA AUTORA..... | 102 |
| FIGURA 28 | ILUSTRAÇÃO ESQUEMÁTICA DOS MOLDES CILÍNDRICOS..... | 102 |
| FIGURA 29 | COMPARAÇÃO DO TAMANHO DAS PARTÍCULAS ANTES E APÓS PENÉIRAMENTO..... | 106 |
| FIGURA 30 | VALORES MÉDIOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL PARA CORPOS DE PROVA PRODUZIDOS COM VIBRAÇÃO DE 220 N E 440 N, PARA DIFERENTES DIMENSÕES DE PARTÍCULAS..... | 109 |
| FIGURA 31 | VALORES MÉDIOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL PARA CORPOS DE PROVA COM DIFERENTES DIMENSÕES DE PARTÍCULAS PRODUZIDOS COM VIBRAÇÃO DE 220 N..... | 110 |
| FIGURA 32 | VALORES MÉDIOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL PARA CORPOS DE PROVA COM DIFERENTES DIMENSÕES DE PARTÍCULAS PRODUZIDOS COM VIBRAÇÃO DE 440 N..... | 111 |
| FIGURA 33 | MESA VIBRATÓRIA, COMPOSTA DE MOTOR ELÉTRICO ACOPLADO A UMA PRANCHA DE COMPENSADO | 119 |
| FIGURA 34 | VALORES MÉDIOS DOS RESULTADOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL AOS 28 DIAS DE CURA, UTILIZANDO DIFERENTES TEORES DE ADITIVOS e ADIÇÕES | 123 |
| FIGURA 35 | MOLDE CILÍNDRICO DE PVC, COM 70 MM DE DIÂMETRO..... | 131 |
| FIGURA 36 | PARTÍCULAS SEM PRÉ-TRATAMENTO (ESQ), PARTÍCULAS COM MATERIAL CARBONATADO (DIR) | 132 |

| | | |
|-----------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| FIGURA 37 | RESULTADOS MÉDIOS DE COMPRESSÃO AXIAL PARA TRATAMENTOS COM 20% E 30% DE ÁGUA PARA DIFERENTES PROPORÇÕES DE MADEIRA:CIMENTO | 136 |
| FIGURA 38 | RESULTADOS MÉDIOS DE COMPRESSÃO AXIAL PARA TRATAMENTOS COM 30% DE ÁGUA PARA DIFERENTES PROPORÇÕES DE MADEIRA:CIMENTO | 138 |
| FIGURA 39 | ENCHIMENTO MANUAL DA VIBROPRENSA: (A) VIBROPRENSA MODELO MBX 200; (B) ABASTECIMENTO DA MÁQUINA; (C) ENCHIMENTO DAS FORMAS | 146 |
| FIGURA 40 | SEQUÊNCIA DA MISTURA DOS MATERIAIS PARA PRODUÇÃO DOS BLOCOS: (A) PARTÍCULAS DE MADEIRA INSERIDAS NO MISTURADOR; (B) ADIÇÃO DA SUSPENSÃO DE Ca(OH)_2 ; (C) ADIÇÃO DO CIMENTO PORTLAND; (D) MISTURA DOS TRÊS MATERIAIS; (E) ADIÇÃO DE ÁGUA; (F) MISTURA PRONTA PARA PRODUÇÃO DOS BLOCOS | 148 |
| FIGURA 41 | SEQUÊNCIA DA PRODUÇÃO DOS BLOCOS NA VIBROPRENSA: (A) RETIRADA DO MATERIAL DO MISTURADOR, PASSANDO PARA A VIBROPRENSA; (B) MATERIAL SENDO VIBRADO E ESPALHADO DENTRO DAS FORMAS; (C) MATERIAL SENDO COMPACTADO PELAS SAPATAS; (D) LEVANTAMENTO DAS FORMAS; (E) BLOCOS SENDO RETIRADOS DA MÁQUINA; (F) BLOCOS ESPERANDO A CURA..... | 149 |
| FIGURA 42 | BLOCOS PRODUZIDOS COM TRAÇO DE 1:2,2 E CIMENTO PORTLAND CP II-Z..... | 150 |
| FIGURA 43 | ENSAIO DE COMPRESSÃO AXIAL DOS BLOCOS VAZADOS..... | 151 |
| FIGURA 44 | PREPARAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA PARA ENSAIO DE CONDUTIVIDADE TÉRMICA..... | 154 |
| FIGURA 45 | ESQUEMA DO FLUXÍMETRO TIPO PLACA QUENTE PROTEGIDA | 154 |
| FIGURA 46 | VALORES MÉDIOS DA DENSIDADE DOS BLOCOS | 157 |
| FIGURA 47 | VALORES MÉDIOS DE ABSORÇÃO DE ÁGUA E UMIDADE DOS BLOCOS..... | 158 |
| FIGURA 48 | VALORES MÉDIOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL PARA ÁREAS BRUTA E LÍQUIDA DOS BLOCOS | 161 |
| FIGURA 49 | VALORES DE CONDUTIVIDADE TÉRMICA DOS BLOCOS PRODUZIDOS, COMPARADOS A ESTUDOS DE OUTROS PESQUISADORES | 163 |
| FIGURA 50 | VALORES DOS CUSTOS DOS BLOCOS (TIPO A, TIPO B e TIPO C).. | 164 |

LISTA DE QUADROS

| | | |
|-----------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| QUADRO 01 | TIPOS DE CIMENTO DISPONÍVEIS NO BRASIL..... | 29 |
| QUADRO 02 | NOMENCLATURA DOS MATERIAIS UTILIZADOS NO PLANO EXPERIMENTAL | 76 |
| QUADRO 03 | DELINEAMENTO EXPERIMENTAL | 84 |
| QUADRO 04 | CARACTERÍSTICAS DOS GRUPOS DE Ca(OH)_2 UTILIZADOS NESTA ETAPA DOS EXPERIMENTOS | 85 |
| QUADRO 05 | MATERIAIS UTILIZADOS PARA CONFEÇÃO DE SETE CORPOS DE PROVA..... | 86 |
| QUADRO 06 | DELINEAMENTO EXPERIMENTAL | 103 |
| QUADRO 07 | MATERIAIS UTILIZADOS PARA PRODUÇÃO DOS CORPOS DE PROVA | 104 |
| QUADRO 08 | DELINEAMENTO EXPERIMENTAL | 120 |
| QUADRO 09 | QUANTIFICAÇÃO DE MATERIAIS UTILIZADOS PARA A CONFEÇÃO DE SETE CORPOS DE PROVA PARA OS TRATAMENTOS APRESENTADOS NO DELINEAMENTO EXPERIMENTAL | 120 |
| QUADRO 10 | DELINEAMENTO EXPERIMENTAL | 131 |
| QUADRO 11 | QUANTIDADE DE MATERIAIS PARA PRODUÇÃO DOS CORPOS DE PROVA PARA OS TRATAMENTOS A, B e C..... | 132 |
| QUADRO 12 | QUANTIFICAÇÃO DE MATERIAIS PARA PRODUÇÃO DOS CORPOS DE PROVA PARA OS TRATAMENTOS D, E e F | 133 |
| QUADRO 13 | CUSTO PARA PRODUÇÃO DOS TRATAMENTOS A e D | 139 |
| QUADRO 14 | CUSTO PARA PRODUÇÃO DOS TRATAMENTOS B e E | 139 |
| QUADRO 15 | CUSTO PARA PRODUÇÃO DOS TRATAMENTOS C e F | 139 |
| QUADRO 16 | DELINEAMENTO EXPERIMENTAL | 147 |
| QUADRO 17 | MATERIAIS UTILIZADOS PARA A PRODUÇÃO DOS BLOCOS .. | 147 |

LISTA DE TABELAS

| | | |
|-----------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| TABELA 01 | DIMENSÕES NOMINAIS DOS BLOCOS DE CONCRETO | 62 |
| TABELA 02 | DESIGNAÇÃO POR CLASSE E LARGURA DOS BLOCOS E ESPESSURA MÍNIMA DAS PAREDES DOS BLOCOS..... | 63 |
| TABELA 03 | REQUISITOS PARA RESISTÊNCIA CARACTERÍSTICA À COMPRESSÃO AXIAL, ABSORÇÃO E RETRAÇÃO | 64 |
| TABELA 04 | PORCENTAGENS RETIDAS NAS PENEIRAS E MÓDULO DE FINURA DOS MATERIAIS T1 E T2 | 73 |
| TABELA 05 | VALORES MÉDIOS DO ÍNDICE DE ESBELTEZ, RAZÃO DE PLANICIDADE E DA ÁREA SUPERFICIAL DAS DIFERENTES PARTÍCULAS..... | 77 |
| TABELA 06 | RESULTADO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DOS CORPOS DE PROVA DOS COMPÓSITOS MADEIRA-CIMENTO, OBTIDAS NOS ENSAIOS PARA OS 15 TRATAMENTOS | 90 |
| TABELA 07 | ANÁLISE DE VARIÂNCIA PARA TAMANHO DA PARTÍCULA E QUANTIDADE DE CAL | 91 |
| TABELA 08 | VALORES MÉDIOS PARA A PROPRIEDADE MECÂNICA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL DOS CORPOS DE PROVA DOS COMPÓSITOS DE MADEIRA-CIMENTO UTILIZANDO TODOS OS TAMANHOS DE PARTÍCULAS..... | 95 |
| TABELA 09 | VALORES MÉDIOS DO ÍNDICE DE ESBELTEZ, RAZÃO DE PLANICIDADE E DA ÁREA SUPERFICIAL DAS DIFERENTES DIMENSÕES DE PARTÍCULAS..... | 105 |
| TABELA 10 | RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL E DENSIDADE APARENTE DOS CORPOS DE PROVA DOS COMPÓSITOS DE MADEIRA-CIMENTO PRODUZIDOS COM DUAS VIBRAÇÕES E DOIS PRÉ-TRATAMENTOS DE PARTÍCULAS..... | 107 |
| TABELA 11 | ANÁLISE DE VARIÂNCIA PARA VELOCIDADE VIBRAÇÃO E DIMENSÕES DAS PARTÍCULAS | 108 |
| TABELA 12 | VALORES MÉDIOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL CORRIGIDOS PELA COVARIÁVEL DENSIDADE, PARA DIFERENTES DIMENSÃO DAS PARTÍCULAS E DUAS VIBRAÇÕES..... | 108 |
| TABELA 13 | RESULTADO DOS VALORES DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL PARA AS VIBRAÇÕES 220 N E 440 N PARA DIFERENTES DIMENSÕES DE PARTÍCULAS | 110 |
| TABELA 14 | VALORES MÉDIOS DO ÍNDICE DE ESBELTEZ, RAZÃO DE PLANICIDADE E DA ÁREA SUPERFICIAL DA PARTÍCULA | 117 |
| TABELA 15 | COMPOSIÇÃO DO CIMENTO PORTLAND CP II-Z | 117 |
| TABELA 16 | CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS DO CIMENTO PORTLAND CP II-Z | 118 |

| | | |
|-----------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| TABELA 17 | PROPRIEDADES FÍSICAS E QUÍMICAS DA SÍLICA DA CASCA DE ARROZ..... | 118 |
| TABELA 18 | ESTATÍSTICAS DESCRITIVAS DA VARIÁVEL RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL..... | 122 |
| TABELA 19 | ANÁLISE DE VARIÂNCIA | 122 |
| TABELA 20 | RESULTADO DO TESTE DE TUKEY PARA COMPARAÇÃO DAS MÉDIAS DAS TENSÕES E AS MÉDIAS DAS DENSIDADE APARENTES..... | 122 |
| TABELA 21 | RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL E DENSIDADE APARENTE DOS CORPOS DE PROVA DOS COMPÓSITOS DE MADEIRA-CIMENTO PARA DIFERENTES RELAÇÕES DE ÁGUA, MADEIRA E CIMENTO | 134 |
| TABELA 22 | ANÁLISE DE VARIÂNCIA PARA A RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL DOS CORPOS DE PROVA DOS COMPÓSITOS DE MADEIRA-CIMENTO | 135 |
| TABELA 23 | RESULTADO DO TESTE DE TUKEY DOS VALORES DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL AOS 28 DIAS PARA DIFERENTES ADIÇÕES DE ÁGUA E RELAÇÕES DE MADEIRA:CIMENTO..... | 136 |
| TABELA 24 | RESULTADO DO TESTE DE TUKEY DOS VALORES DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL CORPOS DE PROVA COM 30 % DE ADIÇÃO DE ÁGUA E DIFERENTES PROPORÇÕES DE MADEIRA:CIMENTO | 137 |
| TABELA 25 | ABSORÇÃO DE ÁGUA, TEOR DE UMIDADE E ÁREA LÍQUIDA DOS BLOCOS..... | 156 |
| TABELA 26 | VALORES MÉDIOS DE ABSORÇÃO DE ÁGUA E TEOR DE UMIDADE DOS BLOCOS VAZADOS | 157 |
| TABELA 27 | RESULTADOS DOS ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL AOS 28 DIAS DE CURA DOS BLOCOS | 159 |
| TABELA 28 | VALORES MÉDIOS DE DENSIDADE E RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL AOS 28 DIAS DE CURA DOS BLOCOS | 159 |
| TABELA 29 | VALORES DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL PARA BLOCOS MACIÇOS (UTILIZANDO A ÁREA LÍQUIDA)..... | 160 |
| TABELA 30 | VALORES MÉDIOS DE CONDUTIVIDADE DAS PAREDES DOS BLOCOS..... | 162 |
| TABELA 31 | VALORES DE DENSIDADE E CONDUTIVIDADE TÉRMICA DE ALGUNS MATERIAIS DA CONSTRUÇÃO CIVIL | 162 |
| TABELA 32 | PREÇO PARA PRODUÇÃO DOS BLOCOS TIPO A, B, C E BLOCO CLASSE C - FÁBRICA | 163 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

| | |
|---------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| #2,36 | Partículas de <i>Pinus</i> spp peneiradas passantes pela peneira de 4,75 mm e retidas na peneira de 2,36 mm |
| #4,75 | Partículas de <i>Pinus</i> spp peneiradas passantes pela peneira de 6,3 mm e retidas na peneira de 4,75 mm |
| #6,3 | Partículas de <i>Pinus</i> spp peneiradas passantes pela peneira de 9,5 mm e retidas na peneira de 6,3 mm |
| ABCP | Associação Brasileira de Cimento Portland |
| ABNT | Associação Brasileira de Normas Técnicas |
| ABRAF | Associação Brasileira de Produtores de Floresta Plantada |
| BC | Cimento Portland de baixo calor de hidratação |
| C ₂ S | Silicato dicálcico |
| C ₃ A | Aluminato tricálcico |
| C ₃ S | Silicato tricálcico |
| C ₄ AF | Ferroaluminato tetracálcico |
| Ca(OH) ₂ | Hidróxido de cálcio |
| CaCl ₂ | Cloreto de cálcio |
| CaO | Óxido de cálcio |
| CB3E | Centro Brasileiro de Eficiência Energética em Edificações |
| CETESB | Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental |
| CO ₂ | Dióxido de carbono |
| CP I | Cimento Portland comum |
| CP I-S | Cimento Portland comum com adição |
| CP II-E | Cimento Portland composto com escória |
| CP II-F | Cimento Portland composto com pozolana |
| CP II-Z | Cimento Portland composto com fíler |

| | |
|----------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|
| CP III | Cimento Portland de alto forno |
| CP IV | Cimento Portland pozolânico |
| CP V-ARI | Cimento Portland de alta resistência inicial |
| CPB | Cimento Portland branco |
| CSH | Silicato de cálcio hidratado |
| CV | Coeficiente de variação |
| IBAMA | Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis |
| IE | Índice de Esbeltez |
| IPCC | Intergovernmental Panel on Climate Change |
| IPT | Instituto de Pesquisas Tecnológicas |
| LAME | Laboratório de Materiais e Estruturas |
| MDF | <i>Medium-Density Fiberboard</i> |
| PSF | Ponto de Saturação das Fibras |
| RILEM | International Union of Laboratories and Experts in Construction Materials, Systems and Structures |
| RP | Razão de Planicidade |
| RS | Cimento Portland resistente a sulfatos |
| T1 | Partículas de <i>Pinus</i> spp moídas uma vez |
| T2 | Partículas de <i>Pinus</i> spp moídas duas vezes |
| UFPR | Universidade Federal do Paraná |
| UFSC | Universidade Federal de Santa Catarina |

LISTA DE UNIDADES

| | |
|---------------------|------------------------------------------|
| " | Polegada |
| °C | Graus Celsius |
| cm | Centímetro |
| cm ² | Centímetro quadrado |
| cm ² /g | Centímetro quadrado por grama |
| cm ³ | Centímetro cúbico |
| g | Grama |
| g/cm ³ | Grama por centímetro cúbico |
| g/kg | Grama por quilograma |
| g/m ³ | Grama por metro cúbico |
| J/g | Joule por grama |
| kg | Quilograma |
| kg/m ³ | Quilograma por metro cúbico |
| kgf/cm ² | Quilograma força por centímetro quadrado |
| m | Metro |
| m ² K/W | Metro quadrado Kelvin por watt |
| mm | Milímetro |
| MPa | Megapascal |
| MPa/s | Megapascal por segundo |
| N | Newton |
| ppm | Partes por milhão |
| RPM | Rotações por minuto |
| W | Watt |
| W/mK | Watt por metro Kelvin |

SUMÁRIO

| | | |
|----------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO | 18 |
| 1.1 | OBJETIVOS | 19 |
| 1.1.1 | Objetivo principal..... | 19 |
| 1.1.2 | Objetivos específicos | 20 |
| 1.2 | ESTRUTURA DA TESE | 20 |
| 2 | REVISÃO DE LITERATURA | 23 |
| 2.1 | COMPÓSITO | 23 |
| 2.2 | COMPÓSITO DE MADEIRA-CIMENTO | 23 |
| 2.2.1 | Vantagens dos compósitos de madeira-cimento..... | 25 |
| 2.3 | COMPONENTES DOS COMPÓSITOS DE MADEIRA-CIMENTO | 26 |
| 2.3.1 | Cimento..... | 26 |
| 2.3.2 | Madeira | 30 |
| 2.3.3 | Madeira do gênero <i>Pinus</i> spp | 35 |
| 2.3.4 | Resíduos de madeira | 36 |
| 2.3.5 | Agregados..... | 39 |
| 2.3.6 | Aditivos e Adições Minerais | 41 |
| 2.4 | COMPATIBILIDADE ENTRE A MADEIRA E O CIMENTO | 43 |
| 2.4.1 | Métodos para melhorar a compatibilidade madeira-cimento..... | 44 |
| 2.5 | CONCEITOS DE ISOLAMENTO TÉRMICO E CONDUTIVIDADE TÉRMICA..... | 46 |
| 2.6 | BLOCOS VAZADOS DE CONCRETO SIMPLES PARA ALVENARIA ... | 49 |
| 2.6.1 | História dos blocos | 49 |
| 2.6.2 | Materiais constituintes..... | 50 |
| 2.6.3 | Máquinas produtoras | 53 |
| 2.6.4 | Métodos de dosagem..... | 54 |
| 2.6.5 | Produção dos blocos de concreto | 55 |
| 2.6.6 | Classificação dos blocos de concreto | 61 |
| 2.6.7 | Nomenclatura e dimensões dos blocos de concreto..... | 61 |
| 2.6.8 | Requisitos físicos e mecânicos | 63 |
| 3 | ORIGEM, PREPARAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DAS PARTÍCULAS DE MADEIRA | 70 |
| 3.1 | INTRODUÇÃO | 70 |
| 3.2 | ORIGEM..... | 70 |
| 3.3 | PREPARAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DAS PARTÍCULAS | 70 |
| 4 | AVALIAÇÃO DOS EFEITOS DE DOSAGENS DE ÁGUA:CAL NA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL DOS COMPÓSITOS DE MADEIRA-CIMENTO COM DIFERENTES DIMENSÕES DE PARTÍCULAS. | 78 |
| 4.1 | RESUMO | 78 |

| | | |
|----------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 4.2 | INTRODUÇÃO | 78 |
| 4.2.1 | Objetivo | 80 |
| 4.3 | MATERIAIS E MÉTODOS | 80 |
| 4.3.1 | Preparação das partículas | 80 |
| 4.3.2 | Aglomerantes | 81 |
| 4.3.3 | Equipamentos | 82 |
| 4.3.4 | Moldes para os corpos de prova | 82 |
| 4.3.5 | Manufatura dos corpos de prova..... | 83 |
| 4.3.6 | Determinação das propriedades mecânicas | 88 |
| 4.3.7 | Análise estatística | 89 |
| 4.4 | RESULTADOS E DISCUSSÃO | 89 |
| 4.5 | CONCLUSÕES | 96 |
| 5 | AVALIAÇÃO DA INTERAÇÃO ENTRE OS FATORES DIMENSÃO DE PARTÍCULAS E VELOCIDADE DA MESA VIBRATÓRIA NA RESISTÊNCIA DO COMPÓSITO DE MADEIRA-CIMENTO..... | 97 |
| 5.1 | RESUMO | 97 |
| 5.2 | INTRODUÇÃO | 97 |
| 5.2.1 | Objetivo | 99 |
| 5.3 | MATERIAIS E MÉTODOS | 100 |
| 5.3.1 | Preparação das partículas | 100 |
| 5.3.2 | Geometria das partículas | 100 |
| 5.3.3 | Aglomerantes | 101 |
| 5.3.4 | Equipamentos | 101 |
| 5.3.5 | Moldes para os corpos de prova | 102 |
| 5.3.6 | Manufatura dos corpos de prova..... | 103 |
| 5.3.7 | Determinação das propriedades físicas e mecânicas | 104 |
| 5.3.8 | Análise estatística | 104 |
| 5.4 | RESULTADOS E DISCUSSÃO | 105 |
| 5.4.1 | Dimensão das Partículas de Madeira | 105 |
| 5.4.2 | Propriedades físicas e mecânicas..... | 107 |
| 5.5 | CONCLUSÕES | 112 |
| 6 | AVALIAÇÃO DOS EFEITOS DA INCORPORAÇÃO DE ADITIVO E ADIÇÃO MINERAL NA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL DE COMPÓSITOS DE MADEIRA-CIMENTO PRODUZIDOS PELO MÉTODO DE VIBRO-COMPACTAÇÃO | 113 |
| 6.1 | RESUMO | 113 |
| 6.2 | INTRODUÇÃO | 113 |
| 6.2.1 | Objetivo | 116 |
| 6.3 | MATERIAIS E MÉTODOS | 117 |
| 6.3.1 | Preparação das partículas | 117 |
| 6.3.2 | Aglomerantes | 117 |
| 6.3.3 | Adição Mineral e Aditivos | 118 |

| | | |
|----------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 6.3.4 | Equipamentos | 118 |
| 6.3.5 | Moldes para os corpos de prova | 119 |
| 6.3.6 | Manufatura dos corpos de prova..... | 119 |
| 6.3.7 | Determinação da resistência à compressão axial | 121 |
| 6.3.8 | Análise estatística | 121 |
| 6.4 | RESULTADOS E DISCUSSÃO | 121 |
| 6.5 | CONCLUSÕES | 125 |
| 7 | AVALIAÇÃO DOS EFEITOS DAS DIFERENTES PROPORÇÕES DE ÁGUA, CIMENTO E MADEIRA, NA RESISTÊNCIA E NO CUSTO, DOS COMPÓSITOS DE MADEIRA-CIMENTO | 126 |
| 7.1 | RESUMO | 126 |
| 7.2 | INTRODUÇÃO | 126 |
| 7.2.1 | Objetivo | 129 |
| 7.3 | MATERIAIS E MÉTODOS | 129 |
| 7.3.1 | Preparação das partículas | 129 |
| 7.3.2 | Aglomerantes | 130 |
| 7.3.3 | Equipamentos | 130 |
| 7.3.4 | Moldes para os corpos de prova | 130 |
| 7.3.5 | Manufatura dos corpos de prova..... | 131 |
| 7.3.6 | Determinação das propriedades físicas e mecânicas | 133 |
| 7.3.7 | Custo dos compósitos | 134 |
| 7.3.8 | Análise estatística | 134 |
| 7.4 | RESULTADOS E DISCUSSÃO | 134 |
| 7.4.1 | Propriedades físicas e mecânicas..... | 134 |
| 7.4.2 | Custo dos compósitos | 139 |
| 7.5 | CONCLUSÕES | 140 |
| 8 | PRODUÇÃO DE BLOCOS VAZADOS DE MADEIRA-CIMENTO DE BAIXA DENSIDADE PARA UTILIZAÇÃO EM ALVENARIA | 141 |
| 8.1 | RESUMO | 141 |
| 8.2 | INTRODUÇÃO | 141 |
| 8.2.1 | Objetivo | 144 |
| 8.3 | MATERIAIS E MÉTODOS | 144 |
| 8.3.1 | Preparação das partículas | 144 |
| 8.3.2 | Aglomerantes | 145 |
| 8.3.3 | Equipamentos | 145 |
| 8.3.4 | Fabricação dos blocos | 146 |
| 8.3.5 | Determinação das propriedades físicas e mecânicas | 150 |
| 8.3.6 | Análise estatística | 155 |
| 8.3.7 | Determinação do custo dos blocos | 156 |
| 8.4 | RESULTADOS E DISCUSSÃO | 156 |
| 8.4.1 | Propriedades físicas..... | 156 |
| 8.4.2 | Propriedades mecânicas..... | 159 |

| | | |
|----------|--------------------------------------------------|------------|
| 8.4.3 | Propriedades térmicas | 162 |
| 8.4.4 | Custo dos blocos..... | 163 |
| 8.5 | CONCLUSÕES | 165 |
| 9 | CONSIDERAÇÕES FINAIS E RECOMENDAÇÕES..... | 167 |
| 9.1 | RECOMENDAÇÕES PARA FUTUROS TRABALHOS | 168 |
| | REFERÊNCIAS..... | 169 |
| | APÊNDICES | 183 |

1 INTRODUÇÃO

A madeira é considerada um dos recursos renováveis mais importantes do planeta, sendo um dos poucos materiais de construção com esta característica, uma vez que, quando uma árvore é extraída, outra pode ser plantada, surgindo, assim, um novo produto.

Nos dias atuais, pode-se notar o aumento da preocupação com o meio ambiente e a concentração de dióxido de carbono (CO_2) na atmosfera. Segundo o *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC, 2013), os níveis de CO_2 atingiram, em 2013, um recorde de 400 ppm no ar, tendo sido gerados por atividades humanas que liberam o carbono terrestre na atmosfera. Para minimizar esse problema, nos próximos anos, a indústria da construção tem o desafio de incorporar a sustentabilidade em seus processos de produção, seja pela busca por novas matérias-primas, seja por meio de produtos que respeitem mais o meio ambiente, contribuindo para a redução de CO_2 na atmosfera (TORKAMAN et al., 2014). Nesse sentido, ressalta-se que o crescimento de uma árvore retira CO_2 da atmosfera, de modo que o uso de madeira em aplicações duráveis na construção é um mecanismo de fixação de carbono. Além disso, do ponto de vista ambiental, é melhor utilizar uma árvore adulta para aplicações duráveis do que deixá-la apodrecer.

Os engenheiros devem se preocupar não somente com os custos de suas construções, mas também com a necessidade de converter os resíduos industriais de construção em materiais úteis. Nessa perspectiva, verifica-se que, com o aumento da consciência ambiental e das razões ecológicas, a indústria está mudando e vem desenvolvendo novos produtos, assim como melhorando a qualidade dos produtos existentes. Sabe-se que produtos que utilizam cimento Portland em sua composição são emissores significativos de gases do efeito estufa, o cimento é fabricado por meio da calcinação a 1.500°C de calcário e tanto a queima de combustíveis como a reação química de descarbonatação são fontes de emissões de CO_2 . Com o intuito de diminuir estes efeitos pode-se utilizar a madeira para reduzir o consumo de cimento, substituindo agregados de origem mineral por agregados vegetais.

Atualmente, existem diversos produtos derivados da madeira, formados por fragmentos desse material, unidos por resina ou outro tipo de aglutinante. Um desses produtos é o compósito madeira-cimento, no qual o cimento é utilizado como

aglomerante. Algumas das vantagens desses compósitos incluem: isolamento térmico e acústico, alto grau de resistência ao fogo e a impactos, ótimas propriedades mecânicas e excelente resistência a ataques de agentes biológicos (IWAKIRI, 2005; LIMA, 2009; SAVASTANO JR, 2000).

Outra preocupação relaciona-se à reciclagem. Nos estudos de Uliana (2005), observou-se que o setor das indústrias moveleiras pouco investia na gestão de resíduos, devido à facilidade de obtenção de matéria-prima e ao baixo custo, existindo conceitos errados com relação à madeira; por exemplo, o fato de ser considerado um recurso inesgotável, além do resíduo madeireiro não ser considerado perigoso, podendo ser descartado de qualquer maneira. Parchen (2012), por sua vez, citou que, devido ao custo e à facilidade de obtenção desse material, em algumas situações acabam ocorrendo depósitos de resíduos resultantes do processamento e desdobro de toras, que em determinadas circunstâncias são incineradas a céu aberto.

No âmbito da reciclagem, destaca-se um mercado em expansão: a utilização dos resíduos por meio de cavaqueamento, para posterior comercialização. O setor florestal, aliás, tem prezado pelo aproveitamento de resíduos, reintegrando-os ao processo produtivo, aumentando, com isso, os rendimentos industriais e reduzindo os impactos ambientais. Os resíduos da indústria madeireira, incluindo casca, costaneiras, serragens, entre outros, antes destinados à queima, hoje aparecem com novos destinos (ABRAF, 2012).

Com o intuito de “armazenar” dióxido de carbono (CO_2), a partir de resíduos da indústria madeireira, e dar continuidade aos estudos realizados por Parchen (2012), conduziu-se esta pesquisa de forma a criar um novo produto, empregando apenas agregados vegetais e cimento, com baixa densidade (leve), baixo custo e formato reconhecido no mercado da construção civil como o bloco vazado.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo principal

Este trabalho tem como objetivo a caracterização de compósitos de madeira-cimento, assim como blocos vazados leves para alvenaria, produzidos com resíduos de madeira de *Pinus* spp e cimento Portland, de modo a obter um produto com baixa densidade e baixo custo.

1.1.2 Objetivos específicos

Como objetivos específicos destacam-se os seguintes:

- Estudar e avaliar proporções de óxido de cálcio (CaO) e água utilizados na produção de suspensão de hidróxido de cálcio $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$ para uso no pré-tratamento das partículas de compósitos de madeira-cimento;
- Avaliar o efeito da dimensão das partículas de *Pinus* spp na confecção de compósitos de madeira-cimento por meio de corpos de prova moldados pelo método de adensamento por vibro-compactação;
- Avaliar a influência da velocidade de vibração utilizada para moldagem dos corpos de prova, na resistência à compressão axial dos compósitos;
- Avaliar a influência da utilização de aditivo mineral e superplastificante em compósitos de madeira-cimento;
- Analisar a influência do aumento da dosagem de cimento na resistência à compressão axial e densidade aparente do compósito;
- Avaliar as influências na qualidade de compósitos de madeira-cimento ocorridas com a modificação da adição de água utilizada na produção dos corpos de prova;
- Produzir blocos vazados de madeira-cimento com baixa densidade, e avaliar suas propriedades físicas e mecânicas e seu custo.

1.2 ESTRUTURA DA TESE

Esta tese está organizada em nove capítulos, sendo o primeiro uma introdução ao tema estudado.

O capítulo 2 consiste na revisão de literatura sobre temas pertinentes, tais como: compósitos de madeira-cimento, seus materiais constituintes, análise sobre a utilização de resíduos e produção de blocos de concreto.

No capítulo 3, é apresentada a origem e a caracterização granulométrica das partículas de madeira, que foram utilizadas na fase experimental destes estudos, subdivididos em quatro etapas, conforme os quadros resumos encontrados nos APÊNDICES 1, 2, 3 e 4.

A etapa I das análises experimentais é apresentada nos capítulos 4 e 5. No primeiro é estudada a relação água:cal para produção de suspensão de $\text{Ca}(\text{OH})_2$,

utilizado posteriormente como pré-tratamento das partículas, e no segundo a análise da influência da dimensão das partículas e da velocidade de vibração da mesa usada na moldagem dos corpos de prova. Ao final desta primeira etapa determinou-se a relação de água:cal, a velocidade de vibração da mesa e a dimensão das partículas que seriam utilizadas nas próximas etapas de estudo.

No capítulo 6 é apresentada a etapa II dos estudos experimentais, onde foram utilizados os resultados dos capítulos anteriores para a análise de utilização de aditivo mineral e superplastificante nos corpos de prova dos compósitos de madeira-cimento.

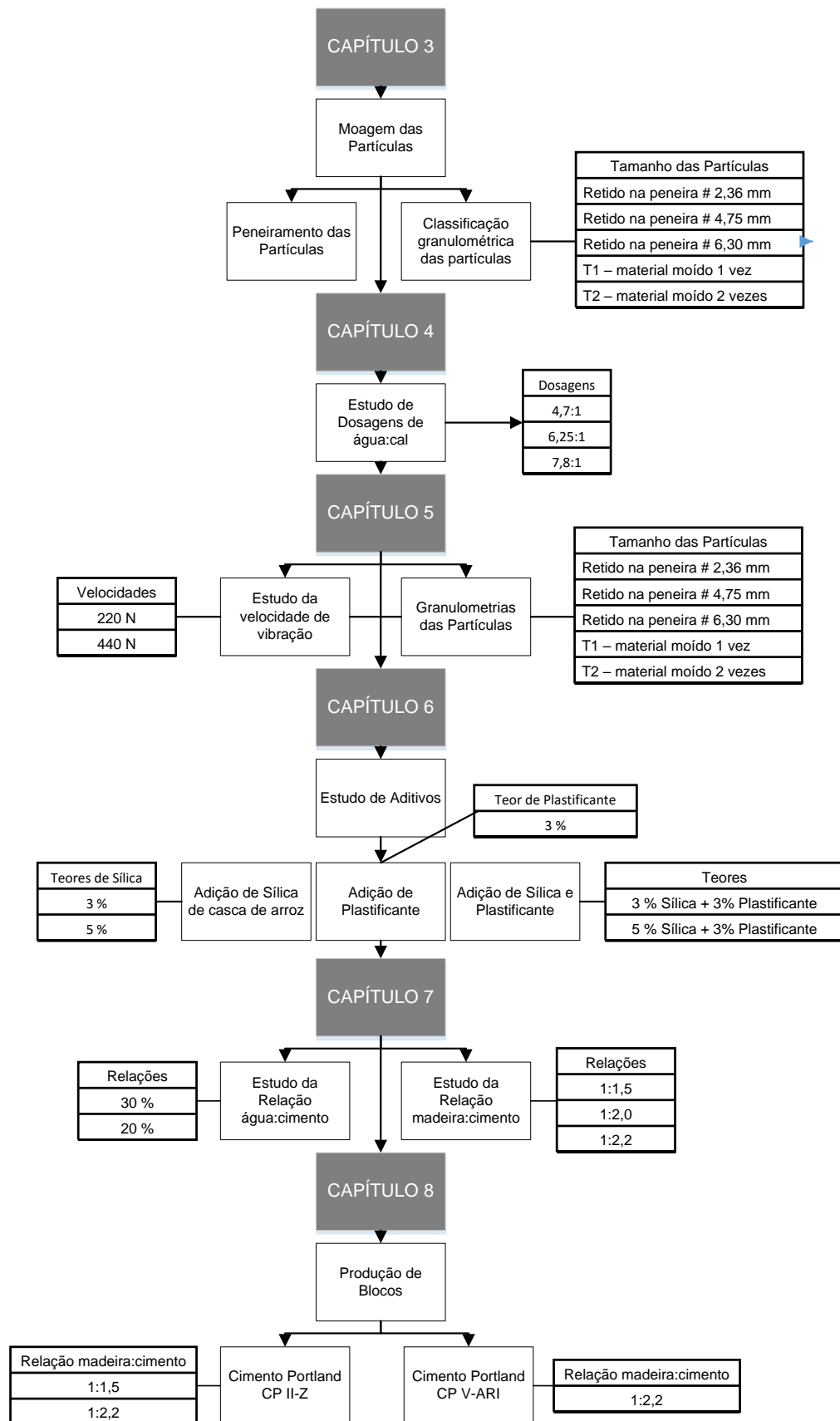
A etapa III é apresentada no capítulo 7, onde é mostrada a análise da influência de diferentes proporções de água, cimento e madeira, na resistência à compressão axial e custo de corpos de prova de compósitos de madeira-cimento.

No capítulo 8, é apresentada a quarta e última etapa dos estudos experimentais, que consistiu na fabricação de blocos vazados, produzidos exclusivamente com cimento Portland, Ca(OH)_2 e agregado vegetal, empregando as melhores combinações resultantes das etapas anteriores, para realização de ensaios de resistência à compressão axial, ensaios de absorção de água, teor de umidade e área líquida e determinação da condutividade térmica dos blocos. Assim como os custos para a fabricação dos blocos vazados.

Por fim, no capítulo 9, estão apresentadas as considerações finais, conclusões do estudo e temas para pesquisas futuras.

O fluxograma apresentado na FIGURA 01 resume os estudos realizados dos capítulos 3 ao 8.

FIGURA 01 – FLUXOGRAMA DOS ESTUDOS REALIZADOS DO CAPÍTULO 3 AO 8



FONTE: A autora (2016)

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 COMPÓSITO

Compósito é um material produzido por meio da combinação de dois ou mais materiais distintos, que permanecem identificáveis na mistura. O novo material tem propriedades diferentes dos componentes puros e pode ter a combinação de suas propriedades. Segundo Budinski e Budinski (2009), é formado por pelo menos duas fases, uma polimérica (matriz polimérica) e outra de reforço, sendo necessária, para sua formação, uma interação química e/ou física entre a matriz polimérica e a de reforço.

De maneira geral, compósitos são materiais multifásicos que exibem as propriedades das fases que os constituem, obtendo-se, assim, uma melhor combinação de propriedades (CALLISTER JR, 2002). Como são compostos por materiais heterogêneos, suas propriedades estão de acordo com a proporção dos componentes e suas características. Por essa razão, devem-se conhecer e estudar suas propriedades físico-mecânicas, a fim de avaliar corretamente o material ou produto final (MARTINS, 2002).

2.2 COMPÓSITO DE MADEIRA-CIMENTO

A história deste compósito tem mais de cem anos, havendo relatos de sua produção em 1908, na Áustria. De acordo com Moslemi (1999), sua utilização industrial teve início na década de 1930 e se intensificou na Segunda Guerra Mundial, pois materiais típicos da construção, como metal e madeira sólida, passaram a ser estratégicos e tiveram seu uso limitado (IWAKIRI, 2005). Durante os anos 1960 e 1970, após a confirmação de que o amianto causava problemas de saúde, vários países passaram a desenvolver produtos utilizando fibras orgânicas (MOSLEMI, 1999); empresas na Austrália e Europa, por exemplo, começaram a desenvolver processos para fabricação de placas de cimento reforçadas com fibra de celulose (WOLFE; GJINOLLI, 1997). Ainda nesse sentido, a empresa Durisol é conhecida como uma das pioneiras, tendo produzido um painel de construção composto por pequenos flocos de madeira vinculados à matriz de cimento. Esse painel tinha 20% em peso de madeira e sua densidade era de, aproximadamente, 1.300 kg/m^3 (WOLFE; GJINOLLI, 1997).

De acordo com Evans (2000), a substituição bem-sucedida de fibras de amianto por fibras de madeira-cimento levou a uma rápida expansão das indústrias que produziam com cimento e madeira, principalmente na Austrália e na América do Norte, além da diversificação dos produtos fabricados. No entanto, o alto custo e a sofisticação tecnológica dessas fábricas constituíram desafios para seu desenvolvimento em países menos desenvolvidos.

Youngquist (1999) definiu os compósitos de madeira e produtos inorgânicos como produtos ou painéis que contêm entre 10% e 70% em peso de fibras de madeira e de 30% a 90% de produtos inorgânicos. As propriedades adequadas desse tipo de compósito são alcançadas quando as partículas de madeira são completamente envolvidas com o material aglomerante, produzindo, assim, um compósito final mais homogêneo. Os principais aglomerantes inorgânicos são o gesso, o cimento de magnésio e o cimento Portland – os dois primeiros suscetíveis à umidade, o que restringe suas aplicações a ambientes internos, enquanto os compósitos utilizando cimento Portland apresentam maior durabilidade se comparados à madeira, podendo seu uso ser interno ou externo.

Por sua vez, Matoski e Iwakiri (2007) dissertaram que o compósito cujas partículas de madeira estão envolvidas por um ligante – no caso, o cimento – apresenta como vantagens resistência e dureza relativamente maiores que as dos materiais separados, além de baixa densidade. Isso porque o cimento dissipa o esforço entre as partículas de madeira, mantendo-as protegidas do meio; já a madeira aumenta sua resistência à tração, contribuindo para a redução do custo e da densidade. Ainda, de acordo com Lipinski (1994), os painéis de madeira-cimento reúnem as propriedades desejáveis dos dois materiais, gerando um produto superior, ou seja, possui as qualidades da madeira, como baixa densidade, alta resistência à tração e redução das fissuras, e os benefícios do cimento, como ser incombustível, resistente aos ataques biológicos e à umidade. Wei e Tomita (2000) sugeriram que o material poderia substituir o tijolo e o concreto em determinadas situações.

Diante disso, a cada ano aumenta o número de pesquisas científicas na busca por conhecimento sobre a compatibilidade entre as fibras vegetais e os aglomerantes minerais. São estudadas, por exemplo, as dificuldades e as soluções para a obtenção desses compósitos, envolvendo custos e processos de produção, condicionamento e armazenamento que viabilizem sua execução (PARCHEN, 2012).

2.2.1 Vantagens dos compósitos de madeira-cimento

Os estudos sobre compósitos de madeira-cimento relatam cada vez mais as suas vantagens, como, por exemplo, a baixa densidade, a resistência a intempéries e insetos, as propriedades acústicas e de isolamento térmico. Sua baixa permeabilidade, quando comparados ao compensado, permite que sejam serrados e furados, podendo receber parafusos, além de existir grande disponibilidade de matéria-prima para sua fabricação.

Moslemi (1989) e Semple e Evans (2004) citaram que a baixa densidade permite sua utilização na produção de painéis de fechamento, forros, telhas e elementos de vedação. Por sua vez, Freire (1991) relatou que a presença de fibras orgânicas em matrizes de cimento introduz um acréscimo na resistência à tração, um acréscimo na resistência ao impacto e um controle da fissuração. Já Wolfe e Gjinolli (1997) relataram sua capacidade de absorver e dissipar energia mecânica, sendo, dessa forma, um excelente material para áreas sujeitas a atividades sísmicas ou com cargas de vento pesado, como furacões. Além disso, Coutts e Ni (1995), respaldados por seus estudos, indicaram um incremento na resistência à flexão com a ampliação do comprimento da fibra; contudo, há diminuição da resistência com o aumento do seu volume. Os autores também relataram um acréscimo na resistência à propagação de fissuras utilizando fibras longas, ou seja, é necessária maior energia para arrancar as fibras da matriz, o que resulta em maior capacidade de absorver impactos.

Outra vantagem citada é a rapidez e a facilidade de aplicação, possibilitando a utilização em situações de emergência, como construção de abrigos em regiões atingidas por desastres naturais (RAMIREZ-CORETTI; ECKELMAN; WOLFE, 1998). Cabe também ressaltar que, como as fibras vegetais possuem baixo módulo de elasticidade e alta resistência à tração, seu emprego como reforço às matrizes de cimento proporciona maior resistência ao impacto, devido à maior absorção de energia, resultando em possibilidade de trabalho no estágio pós-fissurado e aumento na capacidade de isolamento termoacústico (SAVASTANO JR, 2000).

Semple e Evans (2004) citaram vários trabalhos que demonstram a durabilidade dos compósitos, mantendo sua resistência mesmo após anos de exposição à intempérie. Os autores atribuem esse ganho de resistência e durabilidade à mineralização dos elementos de madeira pelo cimento. Nesse mesmo sentido, nos

estudos de Matoski (2005), são listadas as principais vantagens dos painéis minerais em relação a outros tipos de painéis de madeira:

- as partículas não precisam ser secadas a baixos teores de umidade;
- o processo de cura é exotérmico;
- o consumo total de energia é menor;
- existe menor perda de material durante o acabamento;
- os materiais utilizados não são tóxicos;
- não há formação de poeira na produção;
- não há problemas de efluentes líquidos.

Entre as limitações, a mais citada é a incompatibilidade química entre o cimento e a madeira, uma vez que, na constituição desta, há açúcares, resinas, fenóis e amido, que podem afetar as reações de hidratação do cimento Portland (MOSLEMI, 1989). Outra desvantagem relatada por Moslemi (1989) refere-se à necessidade de temperatura elevada (80°C por seis a oito horas) ou de muito tempo para cura (18 a 20 dias). Hsu (1992) e Mallari et al. (1997) também mencionaram o longo tempo para cura do cimento Portland, o que leva a uma redução da capacidade de produção e à necessidade de grande estoque.

2.3 COMPONENTES DOS COMPÓSITOS DE MADEIRA-CIMENTO

2.3.1 Cimento

Segundo a Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP, 2013), cimento é definido como um pó fino, com propriedades aglomerantes, aglutinantes ou ligantes, que endurece sob a ação da água; depois de endurecido, mesmo submetido à ação da água, não se decompõe. Ele tem desempenho hidráulico, pois seu endurecimento ocorre em presença de água, além de ser impermeável. Possui, ainda, a propriedade de endurecimento em meio aéreo, reagindo com o CO₂ da atmosfera. De acordo com Mehta e Monteiro (2008), é um material seco finamente pulverizado, que, sozinho, não é aglomerante, mas desenvolve propriedades ligantes como resultado de reações químicas entre os minerais do cimento e a água. O cimento é, então, chamado hidráulico, sendo o cimento Portland o mais conhecido entre eles.

Conforme a ABCP (2013), o cimento Portland é composto por clínquer e adições. O clínquer é o principal componente e está presente em todos os tipos de cimento Portland, tendo como matérias-primas o calcário e a argila; sua propriedade mais importante corresponde à capacidade de, quando em pó, desenvolver uma reação química em presença de água, na qual primeiramente se torna pastoso e, em seguida, endurece, adquirindo elevada resistência e durabilidade. As adições, por sua vez, podem variar, sendo as principais definidoras dos tipos de cimento.

O cimento Portland é produzido por aquecimento, a uma temperatura a partir de 1.450°C, por meio de uma mistura de calcário e argila ou outros materiais de composição semelhante e reatividade suficiente, em fornos rotativos e contínuos. Ocorre, então, a fusão parcial dos minerais e nódulos de clínquer são produzidos, os quais são misturados com uma pequena porcentagem de gesso finamente moído, para se apresentar ao mercado como cimento. Destaca-se que o gesso controla o tempo das reações de hidratação do cimento e pode ser parcialmente substituído por outras formas de sulfato de cálcio (TAYLOR, 1990).

Taylor (1990) cita que, quando se estuda a hidratação do cimento Portland, o termo 'hidratação' consiste na totalidade de mudanças que ocorrem quando o cimento anidro, ou uma de suas fases constituintes, é misturado com água. Uma vez que os principais compostos químicos do cimento Portland são: o silicato tricálcico (C_3S), o silicato dicálcico (C_2S), o aluminato tricálcico (C_3A) e o ferroaluminato tetracálcico (C_4AF), sua hidratação pode ser caracterizada pela sequência de reações químicas entre esses compostos sólidos e a água, levando à reação de pega e ao enrijecimento das misturas de cimento-água (TAYLOR, 1990).

Consoante Mehta e Monteiro (2008), na presença de água, os silicatos e aluminatos citados formam produtos de hidratação que, com o transcorrer do tempo, dão origem a uma massa firme e resistente. A hidratação dos aluminatos (C_3A e C_4AF) na presença da gipsita adicionada na fabricação do cimento resulta na formação de etringitas, as quais assumem forma de agulha e surgem minutos após o início da hidratação, sendo responsáveis pelo fenômeno da pega. Por seu turno, a hidratação dos silicatos dá-se algumas horas após o início da hidratação do cimento, dando origem aos silicatos de cálcio hidratados (C-S-H), que possuem composição química muito variada e são representados genericamente por C-S-H e $Ca(OH)_2$, compostos que preenchem o espaço ocupado previamente pela água e pelas partículas de

cimento em dissolução. Os cristais de C-S-H formados são pequenos e fibrilares e o Ca(OH)_2 forma grandes cristais prismáticos.

As fases dos silicatos e dos aluminatos hidratados, segundo Aïtcin (2000), começam a criar algumas ligações interpartículas, que resultam no endurecimento progressivo da pasta. Após algumas horas, ocorre a redução da velocidade à reação, devido ao fato de alguns grãos de cimento que não reagiram estarem cobertos por uma camada de hidratos, que se torna cada vez mais espessa com o passar do tempo, dificultando que as moléculas de água cheguem às partes não hidratadas. Assim, basicamente, a reação de hidratação consiste na formação de CSH, aluminato de cálcio hidratado, etringita, monossulfaluminato de cálcio hidratado e Ca(OH)_2 , a partir da reação dos compostos do cimento (C_2S , C_3S , C_3A e C_4AF) com a água.

De acordo com Neville (1997), a pega do concreto refere-se à mudança do cimento do estado fluido para um estado rígido. Em geral, após duas a quatro horas, a pasta de cimento Portland começa a apresentar rigidez, ocorrendo perda de fluidez e plasticidade, o que é denominado tempo de início de presa ou pega. Esse tempo deve ser visto e respeitado com muito rigor, pois, a partir desse momento, tanto as agulhas formadas na reação com os aluminatos quanto os cristais gerados na reação com os silicatos serão prejudicados se a mistura cimentícia for manuseada. Além disso, ele pode ser afetado por diversas razões, como as propriedades físico-químicas do cimento, as condições climáticas, a qualidade, a quantidade e a temperatura da água de amassamento. A finura também é fator de influência, podendo diminuir o tempo de pega (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

Quando a pasta passa a ter comportamento de sólido, considera-se que se atingiu o tempo de fim de pega. No final dessa fase, o ligante não apresenta plasticidade, não podendo ser moldado (MAKAR; CHAN, 2008). Essa passagem do estado plástico ao sólido é lenta e contínua, sendo difícil estabelecer o momento em que se considera que houve a pega. Para tanto, utilizam-se ensaios experimentais que, de acordo com procedimentos normalizados, permitem avaliar os tempos de início e fim de pega (ABNT, 2003).

2.3.1.1 Tipos de cimento

O mercado nacional, segundo a ABCP (2013), dispõe de oito opções de cimento, totalizando 11 tipos básicos (QUADRO 01), que atendem com igual

desempenho aos mais variados tipos de obra. O cimento Portland comum (CP I) é referência, por suas características e propriedades.

QUADRO 01 – TIPOS DE CIMENTO DISPONÍVEIS NO BRASIL

| Nome técnico | Sigla | Norma |
|-----------------------------------------------|----------|-----------------------|
| Cimento Portland comum | CP I | NBR 5732 (ABNT,1991) |
| Cimento Portland comum com adição | CP I-S | NBR 5732 (ABNT,1991) |
| Cimento Portland composto com escória | CP II-E | NBR 11578 (ABNT,1997) |
| Cimento Portland composto com pozolana | CP II-Z | NBR 11578 (ABNT,1997) |
| Cimento Portland composto com fíler | CP II-F | NBR 11578 (ABNT,1997) |
| Cimento Portland de alto forno | CP III | NBR 5735 (ABNT,1991) |
| Cimento Portland pozolânico | CP IV | NBR 5736 (ABNT,1999) |
| Cimento Portland de alta resistência inicial | CP V-ARI | NBR 5733 (ABNT,1991) |
| Cimento Portland resistente a sulfatos | RS | NBR 5737 (ABNT,1992) |
| Cimento Portland de baixo calor de hidratação | BC | NBR 13116 (ABNT,1994) |
| Cimento Portland branco | CPB | NBR 12989 (ABNT,1993) |

FONTE: Adaptado de ABCP (2013).

De acordo com a ABCP (2013), os tipos de cimento diferenciam-se conforme a proporção de clínquer, sulfato de cálcio, material carbonático e adições, como escórias, pozolanas e calcário, acrescentadas no processo de moagem. Diferem também em função de propriedades intrínsecas, como alta resistência inicial, cor branca, etc. O próprio CP I pode conter adição (CP I-S); neste caso, de 1% a 5% de material pozolânico, escória ou fíler calcário e o restante de clínquer. Por sua vez, os cimentos compostos (CP II-E, CP II-Z e CP II-F) têm adição de escória, pozolana e fíler, respectivamente, mas em proporções um pouco maiores que no CP I-S. Já o CP III e o CP IV contam com proporções maiores de adição, sendo 35% a 70% de escória (CP III) e 15% a 50% de pozolana (CP IV). O CP V ARI tem a peculiaridade de atingir altas resistências nos primeiros dias devido a uma dosagem diferente de calcário e argila na produção do clínquer, bem como pela moagem mais fina do cimento.

2.3.1.2 Cimentos Compostos

Segundo NBR 11578 (ABNT,1997) o cimento CP-II é modificado e gera calor em velocidade menor do que a do CP I, sendo indicado em lançamento de maciços de concreto, em que o grande volume da concretagem e a superfície relativamente pequena reduzem a capacidade de resfriamento da massa. Também apresenta maior resistência ao ataque dos sulfatos contidos no solo.

O CP II-Z possui adição de material pozolânico, sendo empregado em obras civis, subterrâneas, marítimas e industriais e comercializado facilmente em lojas de

materiais de construção, com custo não muito alto. Pode ser utilizado na produção de argamassas, concreto simples, armado e protendido, elementos pré-moldados e artefatos de cimento, sendo o concreto feito com ele mais impermeável e, portanto, mais durável (ABCP, 2013).

2.3.2 Madeira

A madeira, devido ao fato de ter origem natural, apresenta características ímpares, tratando-se de material de natureza complexa, multicomponente, higroscópico, anisotrópico, heterogêneo, descontínuo, inelástico, fibroso, poroso, biodegradável e renovável. Sua estrutura fibrosa resulta em características anisotrópicas, ou seja, reações diferentes em função do sentido da solicitação em relação as suas fibras (MATOSKI, 2005).

Quando comparada a outros materiais de construção, a madeira apresenta propriedades específicas vantajosas, sendo que as propriedades físicas e, especialmente, mecânicas diferem consideravelmente consoante o plano direcional em que o material é aplicado – longitudinal, radial ou tangencial (ALVITO, 2013). Isso porque a madeira é um material heterogêneo, anisotrópico e adaptado ao clima ou região onde se desenvolve. Ainda nesse sentido, Alberto, Mougél e Zoulalian (2000) destacam que suas características químicas e físicas são aspectos fundamentais com grande influência no produto final.

Os mesmos autores indicaram que, devido à quantidade de extrativos que podem estar presentes na madeira, nem todas as espécies reagem favoravelmente ao cimento Portland (ALBERTO; MOUGEL; ZOULALIAN, 2000). A esse respeito, Simatupang et al. (1978) dissertam que a madeira, para ser utilizada como agregado em compostos de cimento, deve atender a algumas propriedades específicas, sendo as mais importantes: densidade, usinabilidade, conteúdo de umidade e conteúdo de sílica.

Cabe informar que, visto a diversidade de características desse material, optou-se, neste trabalho, por abordar apenas as mais importantes na fabricação de compósitos de madeira-cimento.

2.3.2.1 Propriedades mecânicas

Na engenharia, é importante o conhecimento das propriedades mecânicas de um material para que seja possível relacionar as resistências e deformações com as tensões aplicadas. A madeira, por ser um material anisotrópico, possui propriedades mecânicas únicas e independentes na direção dos três eixos ortogonais: longitudinal, radial e tangencial. Portanto, suas propriedades variam de acordo com a direção da carga em relação aos seus três eixos (PINTO, 2007).

Estas propriedades estão divididas em dois grupos: resistência, incluindo as propriedades de compressão paralela e perpendicular à fibra, flexão dinâmica e estática; e elasticidade, abrangendo a elasticidade à flexão estática, que determina a rigidez da madeira.

Em relação às propriedades elásticas, a flexão, fundamental em um material estrutural, é a resistência ao esforço realizado quando o material é usado como um elemento-viga. Com o ensaio de flexão, determina-se o módulo de elasticidade, que mede a rigidez da madeira, característica mecânica muito importante em produtos de uso estrutural, uma vez que tem impacto direto na deformabilidade da estrutura (IVKOVIC et al., 2009).

Conforme Matos (1997), o módulo de elasticidade ou módulo de Young mede a rigidez dos materiais e expressa o esforço hipotético aplicado para que um corpo de 1 cm² de área transversal seja estendido ao dobro do comprimento original. A rigidez da madeira refere-se à sua aptidão de resistir à deformação imposta pela carga e é expressa, numericamente, em ensaios de flexão estática, por meio do módulo de elasticidade, utilizando peças de seção retangular, com dois apoios e um ponto de aplicação da carga. Ressalta-se que, embora o módulo de elasticidade não ofereça informações reais e completas sobre o comportamento de um determinado material, valores altos indicam alta resistência e baixa capacidade de deformação, qualificando-o para fins construtivos (KLOCK, 2000).

Por sua vez, a resistência máxima de um material é definida como o máximo esforço que ocorre na ruptura. Alguns materiais possuem reservas consideráveis de resistência entre o limite elástico e a resistência máxima, sendo essa faixa chamada inelástica; no caso da madeira, ela é muito variável (MATOS, 1997). Ensaio em corpos de prova da mesma espécie, com iguais dimensões e em condições idênticas resultaram em valores de resistência bem variáveis. Essa variabilidade das

propriedades mecânicas da madeira dificulta sua aplicação como material estrutural, principalmente diante de materiais como o aço e o concreto. Comparando-os, verifica-se que o Coeficiente de Variação (CV) do escoamento do aço para construção geralmente é inferior a 0,04 e o de resistência do concreto oscila usualmente entre 0,10 e 0,15 (FUSCO, 1976); já as madeiras com teor de umidade em torno de 12% apresentam CVs da ordem de 0,18 (FREITAS, 1978; LAHR, 1990).

A resistência de uma peça de madeira submetida à flexão é expressa em termos de esforço por unidade de área, por meio do módulo de ruptura à flexão estática, representando o máximo esforço aplicado sobre as fibras nos extremos superior e inferior da seção transversal da peça. Os valores do módulo de ruptura são utilizados para obtenção das tensões admissíveis para diversas formas de utilização desse material (MATOS, 1997).

2.3.2.2 Propriedades químicas

A estrutura química da madeira é complexa. Segundo Costa (2013), basicamente as madeiras possuem a mesma composição elementar, não existindo diferenças consideráveis, sendo que os arranjos dos elementos do lenho definem sua estrutura. Considerando as diversas espécies existentes, os principais elementos são: 50% de carbono, 44% de oxigênio e 6% de hidrogênio, com uma média de cinzas de 0,2% a 0,3%, contendo no máximo 0,1% de nitrogênio (MATOSKI, 2005). Por outro lado, ao se fazer a análise dos componentes, existe variação entre as espécies, dentro da mesma espécie e até na mesma parede fibrosa.

Genericamente, podem-se considerar dois grandes grupos de componentes químicos da madeira: os componentes estruturais e os componentes não estruturais ou extrativos (PEREIRA et al., 2003). O primeiro grupo engloba as substâncias macromoleculares, que constituem a parede celular de todas as madeiras e cuja remoção dessa estrutura implica na utilização de processos químicos ou mecânicos com elevada quantidade de energia, alterando fundamentalmente as propriedades das células. Tais macromoléculas são a celulose, as hemiceluloses e as ligninas. Do segundo grupo, fazem parte as substâncias de massa molecular pequena, como os extrativos e as substâncias minerais, vulgarmente designadas por cinzas, que se encontram no lúmen das células e nos espaços vazios existentes na estrutura da

madeira, podendo ser removidas pela utilização de solventes de polaridade adequada (PEREIRA et al., 2003).

De acordo com Matoski (2005), os componentes das paredes celulares são os elementos estruturais que caracterizam as propriedades físicas da madeira; já os extrativos às vezes afetam a massa específica e a umidade de equilíbrio e indiretamente outras propriedades físicas. Nesse sentido, segundo Latorraca e Iwakiri (2005), a interferência dos açúcares com estrutura molecular amorfa e cristalina torna-se agente promotor da dificuldade de ligação entre a madeira e a matriz de cimento em compósitos de madeira-cimento.

2.3.2.3 Propriedades físicas

Entre as propriedades físicas da madeira, importa, para este estudo, verificar a umidade, a retratilidade e a densidade.

Conforme Hellmeister (1983), no momento de qualificar uma madeira, é importante verificar a umidade do lote comercializado, sendo adotada no país, em conformidade com a NBR 7190 (ABNT, 1997b), a exemplo da maioria das normas internacionais, a umidade de referência de 12%; dessa forma, uma peça ou espécie é considerada mais resistente que outra se sua resistência, ao teor de umidade de referência de 12%, for superior. Observa-se que há uma tendência de o teor de umidade ser inversamente proporcional à densidade da madeira, ou seja, em uma madeira mais densa, mais espaços serão ocupados por sólidos, restando menos espaço vazio para ser preenchido por água (BUSNARDO et al., 1983; FOELKEL et al., 1983).

A retratilidade, por sua vez, é o fenômeno relacionado à variação dimensional da madeira, quando há alteração no seu teor de umidade (IPT, 1985). As variações nas dimensões das peças de madeira começam a ocorrer quando esta perde ou ganha umidade, abaixo do Ponto de Saturação das Fibras (PSF), que, de modo geral, se situa em torno de 28% a 30% de umidade. Assim, esta propriedade deve-se ao fato de as moléculas de água estarem ligadas por pontes de hidrogênio às microfibrilas dos polissacarídeos que formam a madeira. Quando as moléculas são forçadas a sair, deixam um espaço e as forças de coesão tendem a reaproximar as microfibrilas, causando a contração da madeira. No fenômeno da expansão ocorre o contrário: a

água absorvida pela madeira tende a penetrar entre as microfibrilas, causando seu afastamento e o consequente inchamento da peça.

Entre as propriedades físicas, a que se destaca como de fundamental importância para a produção tecnológica e utilização da madeira é a densidade, característica muito complexa resultante da combinação de diversos fatores, sendo importante na determinação das propriedades físicas e mecânicas que caracterizam diferentes espécies de madeira, bem como distintas árvores de uma dada espécie e diversas regiões de uma mesma árvore. Nesse sentido, Oliveira et al. (1990) defendem que, apesar de a densidade ser uma boa indicadora de qualidade da madeira, em virtude das várias correlações com outras propriedades, deve-se ter cuidado quando analisada de forma isolada, pois não é um parâmetro seguro. Já para Hellmeister (1983), é a propriedade mais significativa para caracterizar madeiras destinadas à construção civil ou à fabricação de painéis.

Entre as várias maneiras de expressá-la, uma das mais práticas é a densidade básica, que é a relação entre o peso absolutamente seco da madeira, em gramas ou toneladas, e seu volume, em centímetros cúbicos ou metros cúbicos, quando em estado de completa saturação de água (FOELKEL et al., 1971). Oliveira (1997), por sua vez, relata duas formas de expressá-la: a densidade básica e a densidade aparente, sendo esta aferida pela determinação de massa e volume a um mesmo valor de teor de umidade, que, para as condições internacionais, é de 12%. O autor cita, ainda, que a densidade aparente, do ponto de vista prático, tem maior interesse, uma vez que influencia a porosidade da madeira. Dias e Lahr (2004), após estudarem 40 espécies nativas brasileiras, apresentaram relações entre a densidade aparente e demais propriedades físicas, de resistência e de rigidez da madeira. Por meio de análise de regressão, criaram equações que permitem estimar as propriedades de resistência e rigidez mediante a densidade aparente.

Conforme Kollmann e Côté (1968), as variações de densidade nas madeiras devem-se às diferenças na sua estrutura anatômica, à quantidade de extrativos presentes por unidade de volume e, sobretudo, à idade da árvore, genótipo, índice de sítio, clima, localização geográfica e tratamentos silviculturais. No caso de madeiras da mesma espécie, as variações ocorrem devido às alterações nos componentes estruturais e químicos. Os autores também sustentam que a densidade é fortemente influenciada pelo teor de umidade.

Para a produção de painéis de madeira-cimento, Iwakiri et al. (2000) indicaram que a densidade da madeira utilizada deve ser de média a baixa, assegurando-se, assim, a razão de compactação do painel dentro de níveis adequados para a densificação e consolidação do material. No caso de madeiras exageradamente leves, Simatupang, Schwarz e Broker (1978) comentam que as partículas podem não apresentar uma resistência adequada, de modo que a massa específica deve estar entre 0,3 e 0,8 g/cm³.

2.3.3 Madeira do gênero *Pinus* spp

Atualmente, existe uma considerável quantidade de informações na literatura sobre a madeira de *Pinus*. Com o passar dos anos, crescem ainda mais essas informações, inclusive em *sites* dedicados a divulgar informações sobre o gênero, com diversos artigos relacionados.

Segundo Lima, Jará e Alfonso (1988), o gênero *Pinus*, da família *Pinaceae*, é composto por plantas lenhosas, em geral arbóreas, de altura variando de 3 a 50 m. As plantas têm tronco reto, mais ou menos cilíndrico, e copa em forma de cone, com folhas em formato de acículas, agrupadas em fascículos. Sua madeira apresenta massa específica que varia de 400 a 520 kg/m³, a 15% de umidade. A cor da madeira do cerne oscila do amarelo-claro ao alaranjado ou castanho-avermelhado. Caracteriza-se por apresentar baixa resistência à flexão estática, compressão paralela à grã e baixa massa específica. Por conta dessas características, é fácil seu desdobro, permitindo sua aplicação em diversos produtos (MATOSKI, 2005). Lima (2009) cita que, além de apresentar características tecnológicas adequadas para o aproveitamento em serraria, fornece material de boa qualidade para a produção de celulose. Ademais, Matoski (2005) afirma que, durante o processo mecânico, gera grande quantidade de resíduos, que podem ser utilizados nas indústrias de painéis do tipo *Medium-Density Fiberboard* (MDF), aglomerados e painéis afins.

De acordo com o anuário estatístico da Associação Brasileira de Produtores de Floresta Plantada (ABRAF, 2012), a área de plantio de *Pinus* totaliza 1,56 milhão de hectares, estando 84,7% dela concentrada na Região Sul do país, devido às condições climáticas e à localização dos principais centros de processamento desse tipo de madeira. O Estado do Paraná lidera o *ranking* de área plantada de *Pinus*, com 39,7% da área total, seguido por Santa Catarina, com 34,5%. Em relação à sua

produtividade média, ela varia de 18 a 28 m³/ha/ano, existindo sítios e manejos em que ultrapassa 40 m³/ha/ano. Essa grande diferença pode ser devido a características técnicas (genótipos e nutrição) ou operacionais (qualidade de preparo do solo, plantio e tratos culturais).

O *Pinus* vem se diversificando em termos de espécies, procedências e clones, como também expandindo suas áreas de plantio e formas de manejo. Seus plantios possuem diversos destinos, como a produção de madeira para fibras, serrarias, produtos sólidos, resina e resíduos, sendo também utilizados como biomassa ou substratos orgânicos (IPEF, 2014). Nesse sentido, destaca-se que, no período de 2002 a 2012, o mercado de painéis de madeira industrializada cresceu de 3,1 milhões de toneladas para 7,3 milhões de toneladas, um aumento médio de 8,9% ao ano. No mesmo período, a produção de produtos serrados evoluiu de 8,3 milhões de metros cúbicos anuais para 9,2 milhões de metros cúbicos, um acréscimo de 1% ao ano (ABRAF, 2012).

2.3.4 Resíduos de madeira

De acordo com a Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (CETESB, 1985),

resíduo é todo material descartado nas cadeias de produção e consumo que, por limitações tecnológicas ou de mercado, não apresenta valor de uso ou econômico, podendo causar impactos negativos ao meio ambiente quando manejados de maneira imprópria.

Convencionalmente, o resíduo florestal é definido como todo e qualquer material resultante da colheita ou do processamento da madeira, como também de qualquer outro recurso florestal que permaneça sem utilização definida ao longo do processo, sendo descartado durante a produção (NOLASCO, 2000).

O Brasil apresenta um elevado número de indústrias de base florestal, sendo muitas delas ainda dotadas de equipamentos antigos e sem manutenção, causando baixa produtividade e maior perda de matéria-prima (RECH, 2002). De fato, as indústrias de transformação primária possuem baixo rendimento e geram grandes quantidades de resíduos no processo produtivo. Com o crescimento do mercado, aumenta a quantidade de resíduos, que, muitas vezes, não têm utilização na indústria em que foram gerados (BRAND et al., 2002).

De acordo com Teixeira e César (2012), a indústria madeireira usa os recursos naturais de maneira ineficiente, tanto na obtenção da matéria-prima quanto na fase de produção e no descarte dos produtos no final da vida útil. Freitas (2000) cita que uma das provas dessa ineficiência é a grande geração de resíduos, que, segundo o Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA, 2015), está em torno de 30% a 60% de toda a árvore, dependendo da empresa. Isso significa que apenas um terço da madeira extraída é transformado em produto final.

Para Chipanski (2006), em virtude das características da madeira e do processo de fabricação, que vai da produção de cavacos até a transformação do material em menor granulometria, a geração de resíduos é um aspecto muito importante na indústria de painéis. A autora cita que, na empresa Placas do Paraná, para fabricação de painéis aglomerados, o aproveitamento da árvore é de 80%. Ainda nesse âmbito, Uliana (2005) descreve que o setor das indústrias moveleiras pouco investe na gestão de resíduos, devido à facilidade de obtenção de matéria-prima, ao seu baixo custo, à ideia errônea de que a madeira é um recurso inesgotável, ao grande número de micro e pequenas empresas que atuam no setor com baixa capacidade de melhoria tecnológica e ao entendimento equivocado de que o resíduo madeireiro não é perigoso, podendo ser descartado de qualquer maneira. Além disso, a disponibilização de resíduos da madeira sem destinação adequada gera graves problemas ambientais, como o assoreamento, a poluição de rios e a poluição do ar decorrente da sua queima (BRAND et al., 2002).

Tradicionalmente, o uso do resíduo não passa dos limites industriais, servindo de combustível para geração de energia ou, algumas vezes, de forração para pisos de granjas (SOUZA, 2006), sendo que, na verdade, as áreas utilizadas para seu armazenamento poderiam ser destinadas para outros fins. Rech (2002), a esse respeito, afirma que, no Brasil, o emprego mais comum dos resíduos do desdobro tem sido na queima direta para geração de energia, mas que, recentemente, eles também têm sido utilizados no processo de fabricação de painéis aglomerados e MDF. No entanto, devido ao grande volume gerado e à localização descentralizada ou aos altos custos de transporte, os resíduos não utilizados são simplesmente empilhados, permanecendo estocados por muitos anos, de modo que, atualmente, se encontram em diversos estágios de decomposição. Muitas vezes, são queimados ou sofrem combustão espontânea, lançando particulados finos na atmosfera, os quais podem

causar problemas respiratórios e reações adversas na população. Tal fato é corroborado por Teixeira (2005), que disserta que os resíduos acabam dispostos em silos, ao tempo ou em terrenos, podendo esse tipo de armazenamento levar à sua degradação, devido à água de chuvas ou ao ataque de agentes biológicos.

Souza (2006) defende que a extração da madeira pode gerar uma grande quantidade de resíduos, ainda mais considerando os resíduos florestais, que resultam das atividades de extração, e os resíduos industriais gerados pelo beneficiamento do material. Teixeira (2005) classifica esses resíduos da seguinte forma:

- galhos e ápices: sobras do processo destinado a deixar a árvore livre de partes finas;
- cascas: sobra do processo de descasque, quando é retirada toda a parte da proteção natural do tronco;
- costaneira: sobra no formato de meia-lua contendo uma parte de madeira e casca não removida, proveniente da redução da tora em peças retangulares ou quadradas;
- destopo: proveniente do corte das pontas estragadas ou inúteis dos troncos, tábuas ou pranchas;
- serragem: proveniente da ação mecânica de serras e máquinas de desbaste da madeira. Para cada tipo de máquina ou serra, há um resíduo peculiar, mas se classificam tais sobras como finas ou grossas;
- pó de lixamento: proveniente do processo de lixamento, na fase de acabamento, de uma peça. Apresenta-se como um pó muito fino, cuja partícula varia de acordo com o número de aspereza da lixa;
- sobras: peças processadas e acabadas, que apresentam boa qualidade técnica e comercial, mas não foram usadas nos produtos finais;
- rejeitos: peças que, ao sofrer processamento, ficaram abaixo dos padrões técnicos ou comerciais, geralmente por estarem quebradas, empenadas, rachadas ou trincadas.

Parchen (2012) dissertou, no entanto, que tem ocorrido uma mudança de rumo e pensamento a respeito do tema, de modo que o que se considerava “entulho” (material inútil) passou a ser entendido como renovável. Nesse sentido, Stancato

(2006) sustenta que a utilização de resíduos vegetais pode representar uma fonte promissora de exploração industrial. Por sua vez, Barbosa et al. (2014) indicaram que a utilização de resíduos deve ser feita a partir de programas que permitam agregar valores a eles; dessa forma, as empresas processadoras de madeira podem elevar seu índice de competitividade, além de as empresas do segmento florestal poderem se adaptar a parâmetros mais sustentáveis, dando um novo destino aos seus resíduos.

Alguns pesquisadores têm se referido à utilização de resíduos para diversas atividades, tais como: painéis de madeira aglomerada (IWAKIRI et al., 2000), compósitos de plástico-madeira (YAMAJI, 2004) e compósitos de madeira-cimento (LIMA; IWAKIRI, 2012; PARCHEN, 2012). Nessa linha, Souza (2006) cita que uma das grandes vantagens dos painéis de madeira-cimento refere-se à possibilidade de a matéria-prima custar muito pouco, ficando restrita ao transporte. Já de acordo com Beraldo (1997), além de existir grande disponibilidade de matéria-prima, outras vantagens são sua baixa densidade, isolamento termoacústico e baixa permeabilidade, quando comparadas às placas de compensado.

2.3.5 Agregados

Os agregados para concreto são materiais granulares, sem forma e volume definidos, geralmente inertes, com características conhecidas para aplicação em obras de engenharia civil (PETRUCCI, 1971). Podem ser naturais ou artificiais; os naturais são encontrados de modo particulado na natureza (areia, cascalho ou pedregulho), enquanto os artificiais são produzidos por algum processo industrial (pedras britadas, areias artificiais, escórias de alto forno, argilas expandidas, entre outros) (LA SERNA; REZENDE, 2009).

De acordo com Mehta e Monteiro (2008), algumas características relevantes para os agregados utilizados em concreto de cimento Portland são: porosidade, composição ou distribuição granulométrica, absorção de água, forma e textura superficial, resistência à compressão axial, módulo de elasticidade e substâncias deletérias. Ainda segundo os autores, os agregados leves de origem natural e mineral são aqueles que possuem massa específica menor que 1.120 kg/m^3 . Normalmente, são fabricados por meio do tratamento térmico de vários materiais, como argilas, xistos e ardósias. Além disso, são muito frágeis e acabam encontrando aplicação

como material isolante ou de enchimento, podendo produzir concretos com resistência à compressão axial variando de 0,7 a 5,5 MPa.

A utilização de agregados leves em concreto apresenta muitas vantagens, tais como (KAYALI, 2008):

- redução do tamanho das fundações, devido à redução no peso das estruturas das edificações;
- utilização de equipamentos menores e mais baratos para transporte dos pré-moldados mais leves;
- redução das dimensões de pilares, vigas e lajes, resultando em mais espaço;
- alto isolamento térmico;
- resistência ao fogo;
- valor ambiental, uma vez que, quando as matérias-primas necessárias são derivadas de subprodutos industriais, o meio ambiente e a economia do país produtor são beneficiados.

2.3.5.1 Partículas de madeira

Apesar de a tecnologia de produção de concreto afirmar que os agregados são elementos inertes na produção de compósitos de cimento, teoricamente a maioria dos produtos lignocelulósicos pode ser empregada como agregado na produção de painéis minerais. Como agregado, a madeira é utilizada de duas formas: pequenas partículas que compõem os painéis de madeira-cimento ou fibras que compõem os painéis em fibrocimento (IWAKIRI, 2005).

Iwakiri (2005) afirma que as espécies de coníferas têm sido mais empregadas como agregado, visto que apresentam melhor compatibilidade com o cimento em comparação às espécies de folhosas, o que tem sido atribuído à constituição química da madeira. Além da espécie utilizada, outro fator importante é a dimensão das partículas. Nesse sentido, diversos estudos apontam para o fato de a geometria da partícula estar correlacionada com as principais propriedades dos compósitos (AL RIM et al., 1999; SEMPLE; EVANS, 2004; YAMADA, 2002).

De acordo com Iwakiri et al. (2000), as dimensões têm influência marcante sobre as propriedades dos painéis, sobretudo quanto à flexão. As dimensões ótimas

para esses autores devem estar entre 2 e 20 mm de comprimento, 0,2 e 2,5 mm de largura e 0,3 e 0,9 mm de espessura. Ademais, as dimensões influem nas razões de esbeltez e de planicidade, que são as razões entre o comprimento e a espessura das partículas e entre o comprimento e a largura das partículas, respectivamente (IWAKIRI, 1989). Também para Matoski (2005), o consumo de cimento é afetado pelo tamanho das partículas, pois quanto maior a superfície específica das partículas, maior a quantidade de pasta de cimento para envolvê-las e maior a utilização de água para essa pasta. Desse modo, um maior consumo de cimento pode levar a uma maior homogeneidade do compósito, uma vez que há maior quantidade de pasta de cimento. No capítulo 5, serão apresentados vários exemplos em que a dimensão da partícula influencia diretamente os resultados dos compósitos.

Ainda, deve-se sempre observar a função do compósito. Por exemplo, para produção de placas com baixa densidade, mas com bons resultados físicos, alguns autores utilizam estratégias como mudança de orientação, tipo e geometria das partículas. Por fim, a resistência à compressão axial está correlacionada com a densidade e diminui regularmente dependendo do conteúdo total de madeira (AL RIM et al., 1999). Consoante Frybort et al. (2008), compósitos com elevado índice de madeira resultam em baixa densidade, mas apresentam valores elevados para inchamento e podem ser bons isolantes térmicos. Para Del Menezzi, Castro e Souza (2007), isso ocorre para a maioria dos produtos florestais em que a densidade é um importante fator, uma vez que ela está relacionada à maioria das propriedades mecânicas.

2.3.6 Aditivos e Adições Minerais

Segundo a NBR 11768 (ABNT, 2011), aditivos são produtos utilizados em pequenas quantidades para modificar algumas propriedades do concreto, correspondendo, em geral, a um quarto de sua composição. No Brasil, empregam-se, principalmente, retardadores, incorporadores de ar, plastificantes, superplastificantes, aceleradores e retardadores de pega.

Na tecnologia do concreto, os aditivos (químicos ou minerais) são utilizados na produção de artefatos de cimento para modificar as propriedades no estado fresco e endurecido, melhorando seus desempenhos mecânicos e solicitações físicas e químicas, tornando-os mais econômicos e duráveis. No caso das adições minerais,

elas podem ser classificadas em três grandes grupos: material pozolânico, material cimentante e fíler (DAL MOLIN, 2005). Importa destacar que, de acordo com Mehta e Monteiro (2008), seu efeito físico no concreto fresco é visível logo após o endurecimento da pasta, enquanto os efeitos químicos podem levar dias ou até meses para se manifestarem.

Materiais pozolânicos são materiais inorgânicos, tanto naturais quanto artificiais, que, por si só, não apresentam atividade cimentícia, mas, quando finamente divididos e misturados com Ca(OH)_2 ou materiais que o liberam (clínquer de cimento Portland), endurecem na presença de água e temperatura ambiente (MASSAZZA, 1998). São exemplos: cinza volante, pozolana natural, sílica ativa, sílica da casca de arroz, metacaulim, entre outros. O material cimentante, por sua vez, não necessita de Ca(OH)_2 para formar produtos cimentantes, mas sua auto-hidratação é normalmente lenta, sendo a quantidade de produtos formados insuficiente para a aplicação do material para fins estruturais. Já o fíler é uma adição mineral finamente dividida sem atividade química, sendo seu efeito físico de empacotamento (DAL MOLIN, 2005).

Vários tipos de material cimentício alternativos, como sílica ativa, sílica da casca de arroz, metacaulim e outros, têm sido amplamente estudados e utilizados na indústria da construção, como indicam Chatveera e Lertwattanaruk (2009), Coutinho (2003) e Torkaman, Ashori e Momtazi (2014). A sílica da casca de arroz, por exemplo, proveniente da combustão controlada em caldeira com leito fluidificado, é um aditivo mineral que pode ser utilizado como adição e/ou substituição do cimento em dosagens de concreto e artefatos à base de cimento, com ganhos significativos de propriedades.

Nos últimos anos, cresceram as pesquisas para transformação das cinzas da casca de arroz em subprodutos de interesse comercial. Isso porque, com a queima, obtêm-se aproximadamente 20% de sílica, totalizando 480 mil toneladas de sílica por ano no Brasil, quantidade suficiente para suprir o mercado de concretos estruturais e outros (LIMA; IWAKIRI, 2011). Pesquisa de Lima e Iwakiri (2012), comprovaram a possibilidade de uso de cinza volante e escórias de alto forno para substituição parcial do cimento Portland na produção de compósitos de madeira-cimento, contribuindo essa substituição de forma significativa em termos de impacto ambiental.

Por outro lado, Kuntz (2006) relata que, devido à finura da sílica, existe aumento na absorção de água, o que pode levar à diminuição da trabalhabilidade. Nesse contexto, a utilização de aditivo superplastificante na mistura pode reverter o quadro.

Esses aditivos são substâncias orgânicas incorporadas ao concreto em pequenas quantidades, com o propósito de reduzir a relação água:aglomerante. Por essa razão, são chamados redutores de água, mantendo consistência fixa ou alternada, com uma relação água:aglomerante constante (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

Lima (2009) afirma que a utilização de superplastificante é comum na tecnologia do concreto, mas inovadora quando se trata de compósitos de madeira-cimento. O autor limita essa utilização a 4%, pois, acima desse valor, podem aparecer macroporos nos compósitos. Entretanto, nos estudos de Parchen (2012), a utilização de reforçador de aderência e superplastificante produziu maiores resultados quanto à resistência à compressão axial nos compósitos de madeira-cimento. Ressalta-se que a utilização de superplastificantes tem se desenvolvido enormemente nos últimos 20 anos e se mantém em contínuo processo de melhoramento (SPIRATOS; JOLICOEUR, 2000; TSENG et al., 2000; VERONEZ, 2006).

2.4 COMPATIBILIDADE ENTRE A MADEIRA E O CIMENTO

O cimento Portland, quando misturado com água, inicia um processo denominado hidratação, que consiste em processo químico no qual o cimento torna-se uma massa sólida e agregada aos materiais com os quais está em contato. Segundo Matoski (2005), a hidratação dos compósitos de cimento é uma reação exotérmica, uma vez que o cimento, ao entrar em contato com a água, pode liberar até 500 J/g de calor. A adição de outro material, como partículas de madeira ou outros aditivos, pode afetar a magnitude da reação, do tempo de reação e da resistência final do material (HACHMI; CAMPBELL, 1989).

Hachmi e Campbell (1989) relataram que a adesão entre a madeira e o cimento pode ser dividida em três estágios: (i) estágio químico, em que ambos têm alta mobilidade, que diminui com o tempo; (ii) estágio químico e físico, em que o cimento começa a cristalizar e desenvolve uma matriz que envolve a madeira; (iii) estágio físico, que pode continuar por muitos anos.

Devido ao fato de a madeira possuir em sua composição química carboidratos, glicosídeos e componentes fenólicos, que podem retardar ou até inibir a pega do cimento, existe uma grande preocupação entre os pesquisadores sobre como avaliar essa compatibilidade. Nos estágios mais avançados da hidratação, a água e os componentes da madeira dissolvidos migram para a superfície das partículas de

madeira; provavelmente, esses componentes acabam formando uma camada inibitória, prejudicando os estágios mais avançados da hidratação e endurecimento do cimento (HACHMI; CAMPBELL, 1989). Ademais, Beraldo e Carvalho (2004) comentam que, além de se considerar a quantidade de extrativos existentes na madeira, se deve observar o tipo (ácidos graxos, taninos, carboidratos), por eles serem os principais responsáveis pela inibição do endurecimento do cimento.

De modo a avaliar a compatibilidade entre o cimento e as diversas espécies de madeira, vários autores criaram métodos de classificação que verificam se a madeira em estudo interfere ou não no processo de hidratação do cimento, classificando-a como compatível ou incompatível com o cimento. Nesse sentido, Faria (2010) observa que a qualificação da compatibilidade depende da função que os componentes poderão desempenhar. Dessa forma, uma mistura avaliada como moderadamente compatível poderá não ser indicada para elemento estrutural, mas pode ser eficaz como elemento de revestimento.

2.4.1 Métodos para melhorar a compatibilidade madeira-cimento

É possível melhorar a compatibilidade entre a madeira e o cimento mediante tratamentos físicos, químicos e biológicos, sendo os mais simples e usuais a remoção dos extrativos utilizando água fria, quente ou extração por solventes orgânicos, como etanol, tolueno e outros (CASTRO, 2015). Simatupang et al. (1988) apresentam os seguintes métodos de melhoramento: maturação da madeira ou das partículas; extração dos componentes que causam inibição; envolvimento das partículas por alguma substância que impeça a difusão dos compostos da madeira em direção ao cimento; secagem das partículas; utilização de cimento de alta resistência inicial; e utilização de aceleradores de pega.

O melhor método a se adotar é o que viabilize a fabricação do compósito, atuando isoladamente ou em conjunto sobre a madeira e o cimento, para obter a melhor compatibilidade. Por exemplo, a lavagem das partículas proporciona a eliminação de certa quantidade de extrativos, mas a eficiência desse método depende do pH da solução, da temperatura e do tempo de extração, entre outros aspectos. Aparentemente, ela pode melhorar a inibição do cimento, mas, dependendo da partícula vegetal, pode se fazer desnecessária, não mostrando eficiência (CARVALHO, 2000).

Tal fato é confirmado pelo estudo de Beraldo et al. (2002), em que diversas matérias-primas de origem vegetal foram utilizadas para produção de compósitos cimentícios. As partículas foram submetidas a diferentes tratamentos: lavagem em água quente, em soluções diluídas a 5% de cal e soda cáustica, assim como uso de aceleradores (cloreto de cálcio e sulfato de alumínio – 3% em relação à massa de cimento) e mineralização (silicato de sódio a 5% e sulfato de alumínio a 20%), tendo sido também estudadas algumas combinações desses tratamentos. O desempenho desses compósitos foi medido por meio de compressão simples e ensaios não destrutivos (propagação de onda ultrassônica), verificando-se que alguns tratamentos podem ser benéficos para determinadas partículas, mas não para outras, como é o caso da lavagem em água quente, que apresentou bons resultados no bambu e no Angelin, porém, em espécies moderadamente inibitórias, percebeu-se efeito negativo na resistência à compressão axial. No caso da solução de cal, as madeiras de reflorestamento mostraram comportamento homogêneo, apresentando tensão de ruptura média em torno de 8,0 MPa; no entanto, para o bambu, os valores foram decepcionantes. Já o tratamento de solução de soda cáustica só se mostrou moderadamente sensível nas madeiras de *Eucalyptus grandis* e *Pinus caribea*; para as demais espécies, foi menos eficiente que outros tipos de lavagem.

A adição de produtos químicos, conhecidos como aceleradores de pega ou aditivos químicos, está sendo muito utilizada na fabricação de compósitos. Conforme Wei, Min e Tomita (2000), um grupo de aditivos recomendados inclui os cloretos (CaCl_2 , FeCl_3 e SnCl_2), que, misturados em uma quantidade de 4% em relação ao peso do cimento, melhoram as propriedades mecânicas dos compósitos. Contudo, segundo Neville e Brooks (2013), há controvérsias sobre a possibilidade do cloreto de cálcio (CaCl_2) poder induzir à corrosão do aço revestido de concreto; com isso, passou-se a avaliar a proporção máxima do cloreto em relação ao peso do cimento. De acordo com a NBR 6118 (ABNT, 2014a), não é permitido o uso de aditivos contendo cloreto em estruturas de concreto armado; de forma similar, a ACI 318R-05 (ACI, 2005) recomenda limites baixos de cloreto, bem como proíbe o uso de aditivos com cloreto em concreto que contenha armadura.

Certos autores citados por Agopyan (1991) sugerem que o revestimento da partícula de madeira, antes de ser misturada com o cimento, pode melhorar a compatibilidade. Por sua vez, Simatupang, Lange e Neubauer (1987) mencionam a

possibilidade de aplicação de diferentes tipos de bloqueio (silicatos e sulfatos de sódio, magnésio ou alumínio). No trabalho de Zucco (1999), para fabricação de compósitos cimentícios à base de casca de arroz, observou-se que o maior desempenho mecânico foi obtido com o tratamento da casca lavada em solução de cal. O método sugerido é descrito por Serrano e Castro (1985), devendo a casca ficar em banho de imersão por um período de 24 horas em solução de cal, sendo posteriormente lavada em água corrente antes de sua utilização.

Karade, Irle e Maher (2006) sugerem duas maneiras de tratar as partículas com Ca(OH)_2 : imersão em solução seguida de lavagem das partículas e imersão seguida de incorporação do cálcio na madeira. Consoante os autores, o uso da imersão em solução de 1% de Ca(OH)_2 por uma hora mostrou-se mais eficaz que a imersão em água fria e quente nas partículas com granulometria abaixo de 1 mm. Finalmente, nos estudos de Parchen (2012), são realizados três tipos de tratamento nas partículas: imersão em água, imersão em suspensão de Ca(OH)_2 seguida de lavagem e imersão em Ca(OH)_2 sem posterior lavagem. Para o autor, o tratamento com Ca(OH)_2 proporciona uma cobertura mineral na superfície das partículas de madeira, decorrente do efeito da carbonatação, o que acaba reduzindo o fenômeno de inibição. No estudo, as partículas imersas em Ca(OH)_2 e não lavadas apresentaram valores superiores nos ensaios de resistência à compressão axial; além disso, o autor afirma que, por não terem sido lavadas, possuem maior apelo ambiental, pois a água utilizada nas lavagens contém aditivos químicos.

2.5 CONCEITOS DE ISOLAMENTO TÉRMICO E CONDUTIVIDADE TÉRMICA

Como mencionado anteriormente, vários estudos demonstram que os produtos derivados da madeira são excelentes isolantes térmicos (LIMA, 2009; SAVASTANO JR, 2000; STANCATO, 2006). Importa destacar esse fato, pois a adoção de medidas de isolamento térmico em construções tem se mostrado uma técnica importante na conservação de energia.

Ao fabricar um produto para o qual se deseja bom isolamento térmico, um aspecto importante é escolher materiais que possuam baixa transferência de calor, a qual é traduzida pelo coeficiente de condutividade térmica. De acordo com Akutsu e Sato (1988), a condutividade térmica é função do material, da espessura e da diferença de temperatura entre suas faces. Nos materiais compostos, também é

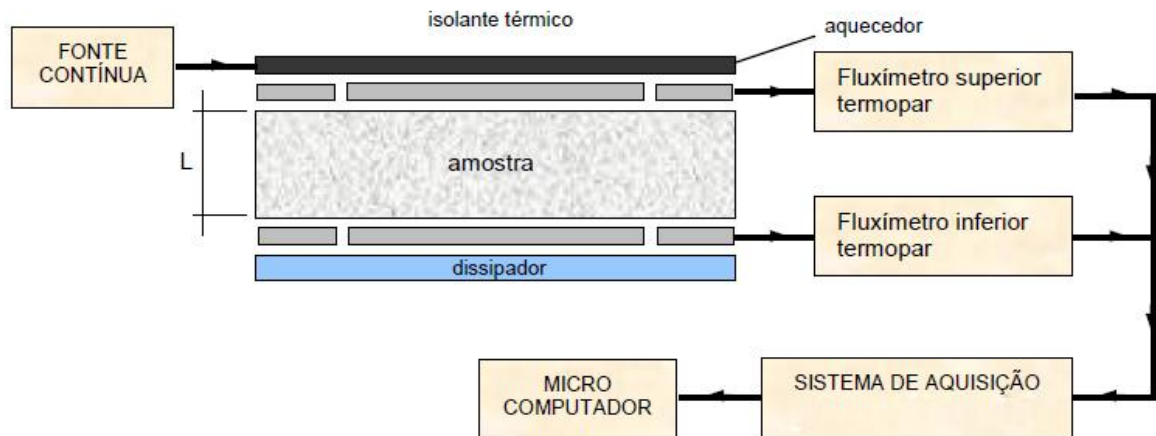
função das propriedades termo físicas das superfícies e da fração de ar aprisionada no interior do material. Assim, ela aumenta em função do teor de umidade dos materiais, uma vez que a água tem capacidade de isolamento inferior à do ar e substitui parte do volume gasoso contido nos poros.

Compósitos cimentícios geralmente são materiais de textura porosa, cuja composição, quantidade de matéria sólida, distribuição, geometria e dimensões dos poros e teor de umidade exercem grande influência na determinação de seu índice de condutividade térmica. No caso de compósitos que possuem fibras vegetais, suas fibras contribuem para a redução da condutividade térmica, em comparação aos compósitos à base de cimento (AKUTSU; SATO, 1988). A esse respeito, Silva (1999) afirma que os materiais com porosidade celular homogênea possuem características isolantes melhores do que as de outros materiais com a mesma densidade, mas com células de ar extrusadas, em que o calor se propaga por convecção natural.

Materiais com bom isolamento térmico podem se traduzir em materiais que garantem bom conforto térmico, que, de acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT, 2008a), é a satisfação psicofisiológica de um indivíduo com as condições térmicas do ambiente, conforme a NBR 15220. Essas propriedades térmicas podem ser medidas por meio de dois grupos de métodos: os métodos estacionários (medição feita pelo fluxo de calor constante) e os métodos dinâmicos (medição de condutividade feita pelo fluxo de calor variável). Estes podem, além da condutividade térmica, permitir a medição da difusividade térmica e do calor específico dos materiais.

Segundo Güths (1990), desde que Fourier definiu a condutividade térmica, vários pesquisadores iniciaram o desenvolvimento de sistemas para sua medição. O método fluximétrico, por exemplo, utiliza técnicas fluximétricas para medir a condutividade térmica em regime permanente, por meio de amostras na forma de placas ou painéis planos, deduzindo-se, por cálculo, as propriedades de resistência e transmitância térmica dessas amostras, conforme a NBR 12094 (ABNT, 1991). O método baseia-se na medição da resistência térmica em regime estacionário, primeiramente com a aplicação de uma densidade de fluxo de calor simultaneamente constante e unidirecional, a partir de duas superfícies mantidas a temperaturas constantes e diferentes uma da outra, por meio da zona central de medição de um fluxímetro e da zona central de uma amostra em forma de placa (FIGURA 02).

FIGURA 02 – ESQUEMA SIMPLIFICADO DO DISPOSITIVO DE MEDIÇÃO DA CONDUTIVIDADE TÉRMICA



FONTE: Adaptado de Stancato (2006).

O fluxo de calor médio que atravessa a amostra é determinado a partir do sinal fornecido pelo condutímetro fluximétrico e de sua constante calibração; já o cálculo da resistência térmica é determinado a partir da lei de Fourier.

$$R = \frac{t_1 - t_2}{\frac{q}{A}} \quad (\text{EQUAÇÃO 01})$$

Em que:

- R: resistência térmica ($\text{m}^2\text{K/W}$);
- q: fluxo de calor médio medido pelos fluxímetros 1 e 2 (W);
- t1 e t2: temperaturas médias nas superfícies das amostras (K).

Considerando a amostra homogênea, é possível determinar a condutividade térmica do material (EQUAÇÃO 02):

$$\lambda = \frac{L}{R} \quad (\text{EQUAÇÃO 02})$$

Em que:

- λ : condutividade térmica (W/mK);

- L: espessura da amostra (m).

De acordo com Güths (1990), o método fluximétrico está bastante difundido, principalmente no meio industrial, devido à sua praticidade e rapidez na obtenção dos resultados.

2.6 BLOCOS VAZADOS DE CONCRETO SIMPLES PARA ALVENARIA

Consistem em elementos pré-moldados de concreto obtidos a partir da mistura adequada entre agregados graúdos e miúdos, cimento, água e, eventualmente, aditivos. A mistura, depois de compactada ou prensada em moldes específicos, ganha resistência e durabilidade suficientes para diversas aplicações, especialmente para a execução de alvenarias (MEDEIROS, 1993).

2.6.1 História dos blocos

Consoante Salvador Filho (2007), por volta de 1880, surgiram nos Estados Unidos e na Inglaterra os primeiros blocos vazados de concreto, visto que as unidades maciças se tornaram impopulares devido ao seu peso excessivo. Esses blocos não eram fabricados com métodos industriais, mas, sim, moldados com formas de madeira.

A partir de 1909, as máquinas ficaram mais modernas e o adensamento começou a ser mecanizado, melhorando a densidade, resistência e uniformidade dos blocos. A primeira máquina tinha capacidade de produzir 600 blocos por dia de dez horas (BESSER, 2004); com a instituição das máquinas semiautomáticas, passou-se a produzir 2.000 blocos por dia (SALVADOR FILHO, 2007). Assim, as dimensões dos componentes foram ficando cada vez mais unificadas, conduzindo à modulação completa que existe hoje.

Na década de 1940, foi introduzida a vibroprensagem no processo de fabricação; com isso, ocorreu uma melhoria na aparência e na resistência dos blocos. Essas novas máquinas chegavam a produzir 5.000 blocos por dia, sendo possível regular a altura e a densidade (SALVADOR FILHO, 2007). Registros de utilização de blocos de concreto no Brasil começaram a aparecer no mesmo período, com a construção de 2.400 residências do conjunto habitacional do Realengo, na cidade do Rio de Janeiro (LORDSLEEM JR et al., 2008).

A partir da década de 1950, máquinas foram importadas dos Estados Unidos para produção desses blocos e, em 1966, foi fundada a primeira fábrica de blocos de concreto de alvenaria estrutural, mas somente na década de 1970 eles se consolidaram no mercado brasileiro (BUTTLER, 2007).

Lima (2009) produziu blocos para alvenaria estrutural utilizando resíduos de *Pinus* spp e materiais cimentícios alternativos, os estudos indicaram a possibilidade de utilização de todos os materiais empregados.

Desde o surgimento dos blocos, muitos esforços foram feitos para modernizar sua fabricação; entretanto, os materiais utilizados e os processos executivos continuam praticamente os mesmos.

2.6.2 Materiais constituintes

Basicamente, os materiais utilizados para a fabricação de blocos de concreto são: aglomerantes (usualmente, cimento Portland), agregados graúdos e miúdos e água. Dependendo de requisitos específicos, podem-se empregar aditivos e pigmentos. Destaca-se que todos os materiais necessários devem ser especificados e utilizados de acordo com suas propriedades, para obter o produto final desejado.

2.6.2.1 Aglomerantes

Existem vários tipos de cimento Portland no Brasil. Segundo a NBR 6136 (ABNT, 2014b), praticamente todos podem ser usados na produção de blocos, desde que obedeçam às normas do cimento utilizado. A maioria dos autores sugere que, entre todos os cimentos produzidos no Brasil, os de alta resistência inicial (CP V-ARI) são os mais adequados para a finalidade de produção de blocos; isso porque o ganho mais rápido de resistência permite contínua reutilização dos moldes, havendo, com isso, maior produtividade na indústria de pré-moldados (SALVADOR FILHO, 2007).

Mesmo o CP V-ARI sendo mais utilizado, outros cimentos podem ser indicados, como, por exemplo, o CP II-F (SOUSA, 2001). Salvador Filho (2007), por sua vez, emprega em seu estudo o CPB-40, para casos em que o concreto permanece aparente e o aspecto estético é imperativo, enquanto Parchen (2012) utiliza CP II-Z, em virtude de sua facilidade de aquisição e do baixo custo.

Outro aspecto importante, conforme Sousa (2001), diz respeito à compatibilidade entre o cimento e os demais materiais, pois, dependendo do processo de cura e das especificações, podem ocorrer alterações nas propriedades dos blocos.

2.6.2.2 Agregados

De acordo com Medeiros e Sabbatini (1993), a qualidade dos agregados é essencial para alcançar boas propriedades nos blocos, pois suas características interferem na aderência com o cimento, alterando a resistência do concreto constituinte. Como os agregados ocupam a maior parte do volume dos blocos, sua resistência mecânica influencia a resistência destes.

Os agregados miúdos normalmente utilizados são a areia natural ou artificial e/ou o pó de pedra. Medeiros (1993) sugere que as areias utilizadas devem possuir grãos duros, compactos, duráveis e limpos, sendo ótimo o uso de areia de rio, visto que se apresenta lavada desde a origem. Por outro lado, o autor condena os resíduos de britagem denominados pó de pedra, por apresentarem elevado teor de materiais finos, com a presença de grãos angulosos de textura áspera, podendo gerar uma mistura de baixa plasticidade.

O pedrisco, entre os agregados graúdos, é o mais usado, devendo estes serem originados da britagem de rochas duras que não possuam sinais de materiais friáveis, como arenitos e micas (MEDEIROS; SABBATINI, 1993).

Cumprir informar que a NBR 6136 (ABNT, 2014b) recomenda que a dimensão máxima do agregado seja tal que permita a obtenção de um concreto homogêneo; além disso, não pode possuir grãos com diâmetro superior à metade da menor espessura da parede do bloco.

2.6.2.3 Aditivos e adições minerais

Segundo Neville (1997), os aditivos são produtos que, adicionados à mistura do concreto, modificam algumas de suas propriedades, melhorando determinadas condições. A NBR 6136 (ABNT, 2014b) permite o uso de aditivos e adições, desde que não acarretem efeitos prejudiciais ao concreto, devidamente comprovados por ensaios. Complementa afirmando que os aditivos não podem conter substâncias capazes de promover a deterioração do concreto dos blocos ou materiais próximos.

Os aditivos mais empregados na fabricação de blocos são os redutores de água, que possibilitam um consumo menor de água sem alterar a trabalhabilidade do concreto e aumentam a resistência mecânica e a textura dos blocos (BUTTLER, 2007; MEDEIROS, 1993; SALVADOR FILHO, 2007). Salvador Filho (2007) comenta que a utilização de aditivos à base de sais de sódio ajuda a diminuir a porosidade do concreto. Pode-se, também, fazer uso de adições minerais, que, ao serem incorporadas na composição do concreto, melhoram suas propriedades físicas e químicas, como densidade, permeabilidade e tendência à fissuração. Como exemplo de adições minerais, podem-se citar a sílica ativa, a cinza volante, a cinza da casca de arroz, a metacaulinita, entre outras. O autor, aliás, emprega metacaulinita em seus estudos e explica que adições minerais cujas partículas são menores que as do cimento ajudam a sanar o problema da desagregação das partículas em traços mais pobres.

2.6.2.4 Pigmentos

Conforme Medeiros e Sabbatini (1993), a utilização de pigmentos possibilitou uma expansão mercadológica da alvenaria de blocos de concreto na direção dos projetos que primam pela estética arquitetônica. Isso porque a coloração transforma a aparência fria e monótona dos blocos em tons alegres, harmônicos e agradáveis, além de os pigmentos oferecerem uma instigante ferramenta de cores para ser utilizada nos projetos de edificação (SALVADOR FILHO, 2007).

Para Konert (1997 apud SALVADOR FILHO, 2007), o pigmento, ao ser adicionado ao concreto, tem sua cor alterada linearmente, porém, à medida que se aumenta sua concentração, chega-se a uma taxa em que sua adição não promove alterações na cor – ponto de saturação –, tornando-se antieconômico. Ademais, Salvador Filho (2007) ressalta que os pigmentos são agregados extremamente finos e inertes, de maneira que uma adição excessiva tende a aumentar a quantidade de água, acarretando maior porosidade e menor resistência à compressão axial.

2.6.2.5 Água

A água usada para fabricação dos blocos de concreto deve ser isenta de substâncias prejudiciais à hidratação do cimento, conforme NBR 6136 (ABNT, 2014b).

Ainda, de acordo com a normalização específica para água destinada ao amassamento de concreto – NBR 15900 (ABNT, 2009a) –, presumem-se como satisfatórias as águas tratadas e utilizadas no abastecimento público, sendo as águas potáveis quase sempre adequadas para a produção dos blocos.

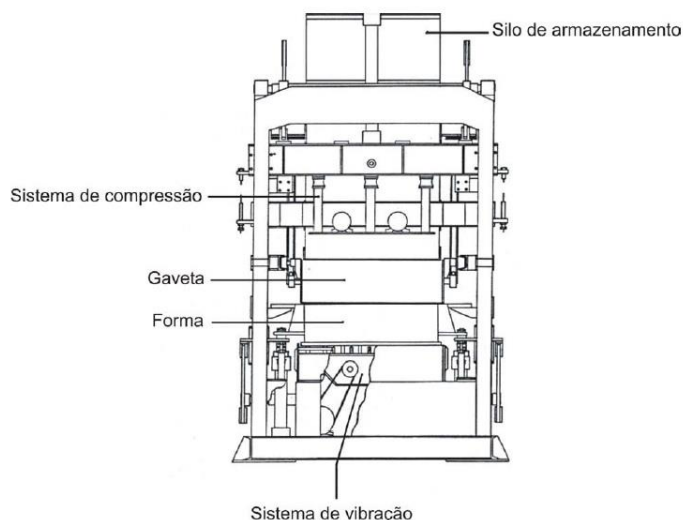
2.6.3 Máquinas produtoras

As máquinas produtoras de blocos de concreto são chamadas vibroprensas, devido ao mecanismo empregado para fazer com que o material penetre e preencha os moldes (MEDEIROS; SABATINNI, 1993). O mecanismo de vibração é responsável pelo preenchimento e adensamento da mistura nos moldes, sendo que à compressão (prensa) influencia o adensamento e o controle da altura dos blocos (SOUSA, 2001).

Segundo Salvador Filho (2007), a vibroprensa é o elemento central de uma fábrica de blocos. Muitas fábricas possuem apenas uma máquina em operação, mas, mesmo em fábricas já estabelecidas, é comum ver máquinas antigas e modernas sendo utilizadas. Na fábrica utilizada em seu estudo, existiam duas máquinas automáticas funcionando, uma semiautomática e uma manual, que estava sendo desativada.

A máquina constitui-se basicamente das seguintes partes: silo de armazenamento, gaveta, sistema de compressão, sistema de vibração e forma ou molde, conforme pode ser visto na FIGURA 03.

FIGURA 03 – PRINCIPAIS PARTES DE UMA VIBROPRENHA



FONTE: Oliveira (2004, p.28).

Buttler (2007) destaca que a resistência dos blocos é proporcional à energia de compactação utilizada na vibração, sendo a eficiência da vibroprensa responsável direta pela qualidade das unidades produzidas.

2.6.4 Métodos de dosagem

O objetivo da dosagem do concreto é a escolha do traço de concreto que, com o equipamento e o processo de produção utilizados, resulte na fabricação de blocos cujas propriedades no estado endurecido atendam às exigências de uso predeterminadas, com o menor custo (TANGO, 1984). Assim, quando se dosa um concreto para produção de blocos, busca-se atingir os critérios de desempenho exigidos pelas normas vigentes, especificadas na NBR 6136 (ABNT, 2014b). Nesse sentido, de acordo com Tango (1984), em geral, fixa-se o traço tendo em vista a resistência à compressão axial e simplesmente verifica-se a absorção de água. Sousa (2001) acredita que esse fato é válido, pois as propriedades estão intimamente relacionadas; dessa forma, a busca por maior resistência resulta na redução dos valores de absorção de água.

Normalmente, a dosagem do concreto possui consistência seca, para que, após o adensamento mediante a compactação, os blocos possam ser desmoldados rapidamente, possibilitando a reutilização do molde. A coesão do concreto no estado fresco é muito importante em função de sua consistência rija, o que acaba impedindo que os blocos recém-moldados sofram variações dimensionais durante o transporte e cura (SALVADOR FILHO, 2007).

Segundo Oliveira (2004), os critérios de desempenho exigidos pelas normas estão ligados ao tipo e à regulação do equipamento de vibrocompressão empregado. Além disso, devido à dificuldade de avaliar as condições superficiais que as misturas proporcionarão às peças, os métodos de dosagem existentes baseiam-se em testes e ajustes excessivos nos equipamentos, o que pode se tornar demorado e oneroso. Para exemplificar, destacam-se os seguintes métodos:

- método Besser Company, método Columbia e método Dowson: são baseados nas curvas granulométricas dos agregados empregados;
- método da ABCP: baseia-se na proporção dos agregados, de modo que resultem na maior compacidade possível;

- método do Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT), adaptado para concretos secos: fixa um teor de água ótimo para o traçado de uma curva prática de resistência em função da relação água:cimento.

2.6.5 Produção dos blocos de concreto

2.6.5.1 Recebimento e estocagem dos materiais

Na descarga dos agregados, deve-se realizar amostragem dos materiais para determinação da curva granulométrica, massa específica, massa unitária no estado solto, entre outras propriedades, devendo a análise das propriedades físicas ser feita a cada lote recebido ou a cada alteração de fornecedor (SALVADOR FILHO, 2007). Na sequência, o material é transportado até o local de armazenamento.

Os materiais devem ser estocados em locais protegidos da chuva, para evitar variações no teor de umidade, de acordo com as especificações dos fabricantes. De preferência, a área de estoque deve ser pavimentada, impedindo a contaminação do solo. A partir dos estoques, os materiais podem ser transportados para sua utilização (MEDEIROS; SABBATINI, 1993).

No caso do cimento, ele deve ser armazenado em local seguro e livre de umidade, podendo ser estocado a granel, em silos industriais ou em saco. Dependendo da forma de estoque, deve-se facilitar sua dosagem em peso, nunca em volume, mesmo que a dosagem dos agregados seja volumétrica (MEDEIROS; SABBATINI, 1993).

2.6.5.2 Mensuração dos materiais

Deve-se efetuar a medida da quantidade de cada material que compõe o traço do bloco, previamente estabelecido pela dosagem do concreto (SOUSA, 2001). Consoante Sousa (2001), esse procedimento pode ser em massa ou volume, porém ressalta-se o fato de que, para produção de blocos com qualidade adequada, com pouca variação entre as peças, é preferível que os materiais sejam proporcionados em massa (SOUSA, 2001; SALVADOR FILHO, 2007).

Tango (1984) indica as principais fontes de variabilidade nesta etapa da fabricação:

- erros durante a determinação da água de amassamento, provocados pela não consideração da umidade dos agregados;
- erros devido ao inchamento da areia, provocando variações no volume, quando utilizada a proporção em volume;
- erros causados por variações na quantidade de cimento, principalmente quando o proporcionamento é em relação ao saco de cimento.

Medeiros e Sabbatini (1993) citaram que, mesmo realizando as proporções em peso, os agregados devem ter suas dosagens corrigidas, pelo fato de as variações no teor de umidade desses materiais serem inevitáveis. Por sua vez, Medeiros (1993) relata que o erro mais comum está relacionado à umidade da mistura, pois, em muitos casos, a água é acrescentada de acordo com a experiência dos funcionários, o que leva a uma grande variação nas propriedades dos blocos, principalmente devido às oscilações no grau de compactação durante a moldagem.

O sistema de medição e determinação da massa dos materiais varia conforme a fábrica, sendo os silos, em algumas mais sofisticadas, equipados com balança digital para a dosagem dos materiais. Essa determinação das proporções de massa de areia, brita, cimento e água é um procedimento essencial para a qualidade final do produto (SALVADOR FILHO, 2007).

2.6.5.3 Mistura e moldagem

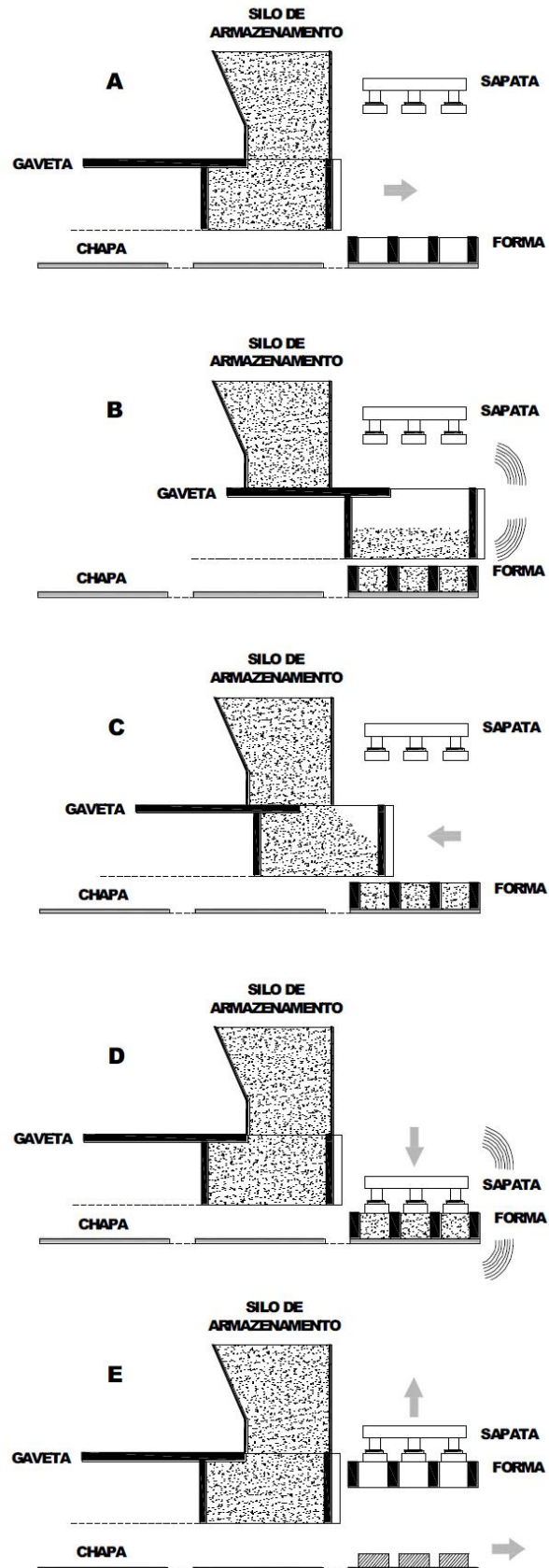
Para Medeiros e Sabbatini (1993), apesar de não receber muita atenção, a mistura dos materiais é de grande importância para a uniformidade da produção, sendo a ordem de colocação e mistura dos agregados, segundo Concrete (1989 apud MEDEIROS; SABBATINI, 1993): carregar os misturadores com os agregados, introduzir o cimento, misturar os materiais a seco por cerca de um minuto, colocar água e aditivo e misturar novamente de dois a quatro minutos. Depois de proporcionada, a mistura é levada aos misturadores, que podem ser de eixo vertical ou horizontal (FRASSON JR, 2000). Durante a moldagem, o material do bloco é colocado na vibroprensa, na qual sofre compactação por vibração e prensagem, lembrando que, para garantir que o produto final obtenha o grau de compactação necessário, se deve respeitar os tempos de alimentação e vibração adequados (MEDEIROS; SABBATINI, 1993).

A sequência de colocação dos materiais e o tempo adequado de mistura devem ser observados, de maneira a ser compatíveis com a produtividade do equipamento (MEDEIROS; SABBATINI, 1993; OLIVEIRA, 2004). Com exceção das máquinas de pequeno porte, a maioria das vibroprensas possui sistema de alimentação totalmente automatizado. Esses sistemas controlam desde o preenchimento dos moldes até o tempo necessário para adensar e liberar os blocos (SOUSA, 2001).

A sequência básica de funcionamento das vibroprensas durante a moldagem dos blocos resume-se nas etapas apresentadas a seguir e mostradas na FIGURA 04 (OLIVEIRA, 2004):

- o ciclo inicia-se posicionando a forma sobre a chapa em que serão moldadas as peças. O concreto que está no misturador é colocado no silo de armazenamento da máquina; em seguida, a gaveta é preenchida com o concreto e avança sobre a forma (FIGURA04 – A);
- durante a passagem da gaveta sobre a forma, são acionados os agitadores e vibradores, que possibilitam uma melhor alimentação e acomodação do concreto. A duração desta etapa é denominada tempo de alimentação, que deve ser ajustado de acordo com a mistura empregada e as características do equipamento (FIGURA04 – B);
- terminada a alimentação, a gaveta é recolhida, com o sistema de vibração desligado, a fim de evitar preenchimentos diferenciados nas diversas posições da forma. A gaveta, então, retorna à origem, para novamente ser preenchida pelo silo de armazenamento (FIGURA04 – C);
- após o recolhimento da gaveta, ocorre a descida das sapatas, responsáveis pela compactação das peças. Simultaneamente, há a vibração. O tempo decorrido nesta etapa é chamado tempo de vibrocompressão e termina quando a peça atinge a altura desejada (FIGURA04 – D);
- finalizando a vibroprensagem, a vibração é desligada e a forma e as sapatas sobem, sendo, assim, realizada a desforma das peças. Uma nova chapa é posicionada, reiniciando o ciclo (FIGURA04 – E).

FIGURA 04 – SEQUÊNCIA DE FUNCIONAMENTO DE UMA VIBROPRENSA



FONTE: Oliveira (2004, p.45).

Diante do exposto, importa destacar alguns conceitos (OLIVEIRA, 2004):

- tempo de alimentação: é o tempo em que a gaveta permanece sobre a forma, com os agitadores ligados para enchimento dos vazados, sendo acionado, simultaneamente, o sistema de vibração para facilitar o enchimento das formas pelo concreto. Vale salientar que este é o único tempo regulável de uma máquina de vibrocompressão, sendo o principal responsável pelo grau de compactação das peças, pois, quanto maior o tempo de alimentação, maior a quantidade de concreto na forma, diminuindo, assim, o volume de vazios e, conseqüentemente, aumentando sua resistência à compressão axial;
- tempo de vibrocompressão: é o tempo decorrido desde o contato das sapatas do contramolde com o concreto até o alcance da altura final da peça. Nesse período, o sistema de vibração permanece ligado. Normalmente, este tempo é de três a seis segundos, sendo função do equipamento e dos materiais empregados, bem como do tempo de alimentação. É, ainda, indicativo de um bom ou mau enchimento da forma. Tempos insuficientes levam à obtenção de peças porosas e de baixa resistência, enquanto tempos excessivos aumentam o tempo de ciclo de produção e o desgaste do equipamento.

2.6.5.4 Cura

Ao término do processo de moldagem dos blocos, eles são transportados até o local da cura, sempre com cautela, para evitar vibrações que possam danificar as peças recém-produzidas. A cura é um conjunto de medidas que visam a proporcionar aos blocos condições de umidade, temperatura e pressão, necessárias a uma adequada reação de hidratação do cimento, uma vez que as condições de umidade e temperatura, principalmente nas primeiras idades, têm muita importância nas propriedades do concreto endurecido (TANGO, 1984).

Consoante Medeiros e Sabbatini (1993), a cura de blocos é especialmente delicada comparada à cura de outros artefatos de cimento, em virtude das condições extremas em que esses componentes são dosados, empregando-se na fabricação

quantidades mínimas de cimento e água. Portanto, se a umidade não se faz presente no ambiente em que são curados, o processo de hidratação do cimento é interrompido e praticamente todas as propriedades dos componentes ficam comprometidas, principalmente a resistência à compressão axial.

Basicamente, existem quatro tipos de cura utilizados na produção dos blocos de concreto:

- cura por meio de autoclaves: utiliza temperatura entre 150 e 205°C e pressão de aproximadamente 1 MPa. Este método é pouco aplicado, em função de seus altos custos de implantação e consumo (MEDEIROS, 1993);
- cura natural ou ao ar livre: é utilizada principalmente em situações em que as exigências de desempenho para os blocos são menores. As condições climáticas favorecem o rápido endurecimento do concreto neste tipo de cura, recomendando-se que os blocos permaneçam úmidos e protegidos do vento e da insolação direta, com a manutenção da umidade do estoque por meio de aspersão de água pelo menos durante os três a sete primeiros dias, para evitar a evaporação excessiva de água (MEDEIROS, 1993; TANGO, 1984);
- cura em câmara a vapor: atualmente, este é o método mais usado, sendo normalmente empregado pelos produtores de blocos que exigem de seus componentes maior desempenho a curtas idades. Efetivamente, a aplicação do vapor produzido por gerador ou caldeira dura cerca de duas horas, em um ciclo total variável de 16 a 24 horas (MEDEIROS; DORNELLES; FRANCO, 1994). Para a realização deste tipo de cura, o bloco deve ser precedido de um período de descanso de duas horas após a moldagem, para evitar fissuras (FRASSON JR, 2000);
- cura com aspersão de água ou câmara úmida: a cura por aspersão de água deve ser realizada a cada duas horas, durante 24 horas, ao passo que a pôr câmara úmida deve ser feita durante cinco dias após a produção dos blocos. No estudo de Sousa (2001), os blocos foram enviados para câmara úmida após 24 horas da moldagem, permanecendo lá por um período de sete dias.

2.6.5.5 Transporte e estocagem

Após a cura, os blocos de concreto devem permanecer preferencialmente em paletes, de madeira ou aço, que tenham dimensões suficientes para que sejam manuseados e transportados até o fim do processo.

As peças devem ser estocadas de forma a constituir um *layout* que facilite sua identificação e carregamento para destinação final (SALVADOR FILHO, 2007).

2.6.6 Classificação dos blocos de concreto

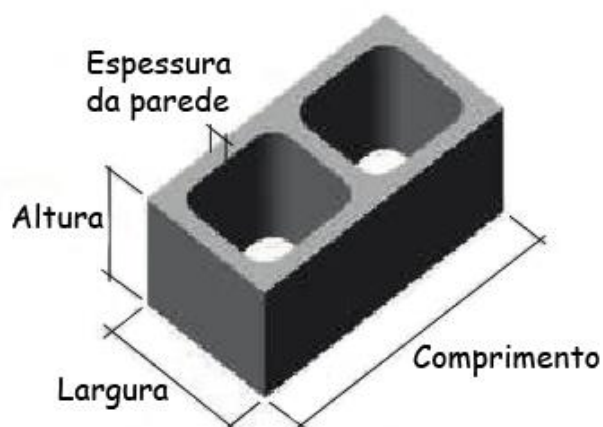
A NBR 6136 (ABNT, 2014b) define três classes de blocos, conforme segue:

- classe A: com função estrutural, pode ser utilizada abaixo do nível do solo, tendo resistência à compressão axial de $f_{ck} \geq 8,0$ MPa;
- classe B: com função estrutural, tem resistência à compressão axial de $4,0 \leq f_{bk} < 8,0$ MPa;
- classe C: admite-se a utilização com função estrutural para blocos com largura maior que 90 mm, sendo permitido o uso no máximo de um pavimento para blocos com largura de 90 mm, no máximo de dois pavimentos para blocos com largura de 115 mm e até cinco pavimentos para blocos com largura de 140 a 190 mm. Os blocos classe C com largura de 65 mm têm seu uso restrito para alvenaria não estrutural.

2.6.7 Nomenclatura e dimensões dos blocos de concreto

De acordo com a NBR 6136 (ABNT, 2014b), a família de blocos é um conjunto de componentes de alvenaria que interagem modularmente entre si e com outros elementos construtivos. Os blocos que compõem a família, segundo suas dimensões, são denominados bloco inteiro (bloco predominante), meio-bloco, bloco de amarração L e T (blocos para encontros de paredes), blocos compensadores e blocos do tipo canaleta. A FIGURA 05 mostra um bloco vazado de concreto, conforme a NBR 6136 (ABNT, 2014b).

FIGURA 05 – BLOCO VAZADO DE CONCRETO SIMPLES



FONTE: ABNT (2014b, p.02).

As dimensões nominais dos blocos vazados de concreto, modulares e submodulares, devem corresponder às dimensões constantes na TABELA 01.

TABELA 01 – DIMENSÕES NOMINAIS DOS BLOCOS DE CONCRETO

| Família | | 20 x 40 | 15 x 40 | 15 x 30 | 12,5 x 40 | 12,5 x 25 | 12,5 x 37,5 | 10 x 40 | 10 x 30 | 7,5 x 40 |
|----------------------|-------------|------------------|---------|---------|-----------|-----------|-------------|---------|---------|----------|
| Medida /nominal (mm) | Largura | 190 | 140 | | 115 | | | 90 | | 65 |
| | Altura | 190 | 190 | 190 | 190 | 190 | 190 | 190 | 190 | 190 |
| | Comprimento | Inteiro | 390 | 390 | 290 | 390 | 240 | 365 | 390 | 290 |
| | | Meio | 190 | 190 | 140 | 190 | 115 | - | 190 | 140 |
| | | 02/mar | - | - | - | - | - | 240 | - | 190 |
| | | 01/mar | - | - | - | - | - | 115 | - | 90 |
| | | Amarração "L" | - | 340 | - | - | - | - | - | - |
| | | Amarração "T" | - | 540 | 440 | - | 365 | - | - | 290 |
| | | Compensador A | 90 | 90 | - | 90 | - | - | 90 | - |
| | | Compensador B | 40 | 40 | - | 40 | - | - | 40 | - |
| | | Canaleta inteira | 390 | 390 | 290 | 390 | 240 | 365 | 390 | 290 |
| | | Meia canaleta | 190 | 190 | 140 | 190 | 115 | - | 190 | 140 |

Nota 1 As tolerâncias permitidas nas dimensões dos blocos indicados neste quadro são de + ou - 2,0 mm para largura e de + ou - 3,0 mm para a altura e para o comprimento.

Nota 2 Os componentes das famílias de blocos de concreto têm sua modulação determinada de acordo com a ABNT NBR 15873.

Nota 3 As dimensões da canaleta J devem ser definidas mediante acordo entre fornecedor e comprador em função do projeto.

FONTE: Adaptada de ABNT (2014b, p.05).

A espessura mínima de qualquer parede de bloco deve atender à TABELA 02, permitindo-se tolerância nas dimensões das paredes de 1 mm para cada valor individual.

TABELA 02 – DESIGNAÇÃO POR CLASSE E LARGURA DOS BLOCOS E ESPESSURA MÍNIMA DAS PAREDES DOS BLOCOS

| Classe | Largura nominal (mm) | Paredes longitudinais ^a (mm) | Paredes Transversais | |
|--------|----------------------|-----------------------------------------|---------------------------|-------------------------------------------|
| | | | Paredes ^a (mm) | Espessura equivalente ^b (mm/m) |
| A | 190 | 32 | 25 | 188 |
| | 140 | 25 | 25 | 188 |
| B | 190 | 32 | 25 | 188 |
| | 140 | 25 | 25 | 188 |
| C | 190 | 18 | 18 | 135 |
| | 140 | 18 | 18 | 135 |
| | 115 | 18 | 18 | 135 |
| | 90 | 18 | 18 | 135 |
| | 65 | 15 | 15 | 113 |

FONTE: Adaptada de ABNT (2014b, p.05 e p.06).

NOTAS: ^a Média das medidas das paredes tomadas no ponto mais estreito. ^b Soma das espessuras de todas as paredes transversais aos blocos (em milímetros), dividida pelo comprimento nominal do bloco (em metros).

A menor dimensão do furo para as classes A e B, atendidas as demais exigências da norma, deve obedecer aos seguintes requisitos:

- maior ou igual a 70 mm para blocos de 140 mm;
- maior ou igual a 110 mm para blocos de 190 mm.

Convém que os blocos classes A e B tenham mísulas de acomodação com raio mínimo de 40 mm e que os blocos classe C tenham mísulas com raio mínimo de 20 mm, com centro tomado no encontro da face externa da parede longitudinal com o eixo transversal do bloco.

2.6.8 Requisitos físicos e mecânicos

Os blocos vazados de concreto prescritos na NBR 6136 (ABNT, 2014b) devem atender aos limites de resistência, absorção e retração linear por secagem estabelecidos na TABELA 03.

TABELA 03 – REQUISITOS PARA RESISTÊNCIA CARACTERÍSTICA À COMPRESSÃO AXIAL, ABSORÇÃO E RETRAÇÃO

| Classificação | Classe | Resistência característica à compressão axial ^a (MPa) | Absorção (%) | | | | Retração ^d % |
|------------------------------|--------|------------------------------------------------------------------|------------------------------|-------------|----------------------------|-------------|-------------------------|
| | | | Agregado normal ^b | | Agregado leve ^c | | |
| | | | Individual | Média | Individual | Média | |
| Com função estrutural | A | $f_{ck} \geq 8,0$ | $\leq 8,0$ | $\leq 6,0$ | $\leq 16,0$ | $\leq 13,0$ | $\leq 0,065$ |
| | B | $4,0 \leq f_{bk} < 8,0$ | $\leq 10,0$ | $\leq 8,0$ | | | |
| Com ou sem função estrutural | C | $f_{ck} \geq 3,0$ | $\leq 12,0$ | $\leq 10,0$ | | | |

FONTE: Adaptada de ABNT (2014b, p.07).

NOTAS: a Resistência característica à compressão axial obtida aos 28 dias. b Blocos fabricados com agregado normal (ver definição na NBR 9935). c Blocos fabricados com agregado leve (ver definição na NBR 9935). d Ensaio facultativo.

Tais exigências devem atender aos seguintes ensaios, consoante NBR 12118 (ABNT, 2014c):

- resistência à compressão axial;
- análise dimensional, absorção e área líquida;
- retração linear por secagem.

2.6.8.1 Ensaio de resistência à compressão axial

Este ensaio é utilizado para verificar a capacidade de carga que os blocos de concreto suportam quando submetidos a forças exercidas perpendicularmente sobre suas faces. Segundo Medeiros (1993), a resistência à compressão axial é o principal parâmetro de projeto da parede de alvenaria, sendo sua verificação de fundamental importância para determinar a segurança estrutural da edificação.

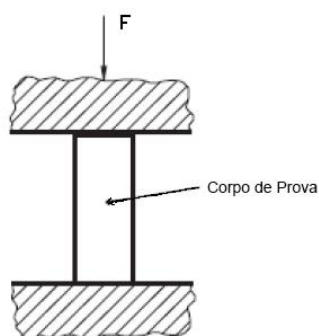
Para realização dos ensaios, devem-se separar os blocos que vão constituir corpos de prova, conforme a NBR 6136 (ABNT, 2014b), ensaiados secos ao ar. Para esse fim, procede-se da seguinte forma:

- para regularização das faces de trabalho dos corpos de prova, devem ser utilizadas pastas ou argamassas capazes de resistir às tensões do ensaio. Elas também podem ser regularizadas por meio de uma retífica adequada;

- a pasta deve ser colocada sobre o molde de capeamento, cuja superfície não pode se afastar do plano mais que 8×10^{-2} para cada 4×10^2 mm, devendo ser previamente untado com leve camada de óleo;
- a espessura média do capeamento não deve exceder 3 mm.

Todos os corpos de prova devem ser ensaiados em prensas equipadas com dois pratos de apoio, de aço, um dos quais articulado, que atuem na face superior do corpo de prova, devendo a máquina de ensaio atender aos requisitos da NBR NM 7500-1 (ABNT, 2004) e pertencer à classe II, no mínimo. O ensaio deve acontecer de modo que a carga seja aplicada na direção do esforço que o bloco precisa suportar durante seu emprego, sendo os corpos de prova colocados na prensa de forma que seu centro de gravidade esteja no eixo de carga dos pratos da prensa. A tensão aplicada deve ser calculada em relação à área bruta, elevando-se progressivamente à razão de $(0,05 \pm 0,01)$ MPa/s. Durante o ensaio, os corpos de prova são submetidos a uma força axial para dentro, distribuída uniformemente em toda a sua seção transversal, conforme FIGURA 06.

FIGURA 06 – ENSAIO DE COMPRESSÃO AXIAL



FONTE: A autora (2016).

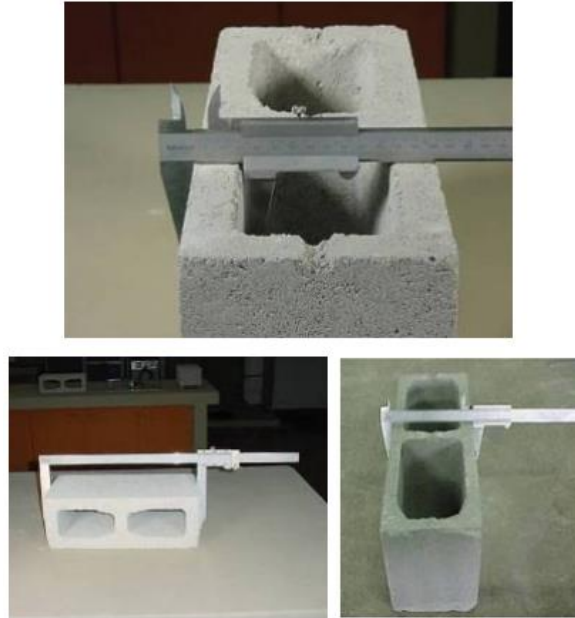
2.6.8.2 Ensaio de análise dimensional

Na análise dimensional, devem ser verificadas as três dimensões principais do componente – largura, altura e comprimento –, além da espessura das paredes e sua conformidade com os parâmetros definidos pela NBR 6136 (ABNT, 2014b), especificados anteriormente.

Para cada dimensão do corpo de prova, devem ser realizadas pelo menos três determinações em pontos distintos de cada face, com resolução de 1 mm, utilizando

escala metálica calibrada e com comprimento adequado à dimensão máxima do corpo de prova (FIGURA 07).

FIGURA 07 – ANÁLISE DIMENSIONAL DE BLOCOS



FONTE: ABCP (2013).

2.6.8.3 Ensaio de absorção de água e área líquida

A absorção verifica a relação entre a massa de água contida no bloco saturado e a massa do bloco seco em estufa até a constância de massa, expressa em porcentagem. A área líquida pode ser determinada sempre que todas as seções paralelas à seção de trabalho são admitidas como iguais e constantes, sendo obtida por meio da massa aparente (aferida por balança hidrostática) e da massa saturada do bloco, de acordo com a NBR 12118 (ABNT, 2014c).

Depois de recebidos, os corpos de prova devem permanecer no ambiente do laboratório por um período de 24 horas, sendo, então, pesados e anotada sua massa (m_3). Após esse período, devem ser tomadas as seguintes providências:

- levar os corpos de prova à estufa, elevar a temperatura a $(110 \pm 5) ^\circ\text{C}$ e mantê-los nessa condição por 24 horas;
- determinar a massa do corpo de prova após o período de 24 horas, anotar o valor encontrado e colocá-lo novamente na estufa por duas horas, sendo admissível que o corpo de prova permaneça no máximo dez minutos fora da estufa durante a medida de sua massa;

- repetir a operação a cada duas horas (considerada a leitura realizada após as primeiras 24 horas), até que em duas determinações sucessivas não se registre diferença de massa superior a 0,5% em relação ao valor anterior, anotando-se, então, sua massa seca (m_1).

Para verificar a saturação, deve-se proceder da seguinte forma:

- após resfriados naturalmente (em contato com o ar) à temperatura ambiente, imergir os corpos de prova em água à temperatura de $(23 \pm 5)^\circ\text{C}$, por 24 horas;
- pesar cada corpo de prova na condição de saturado com superfície seca, obtida drenando-o sobre uma tela de 9,5 mm ou mais de abertura de malha por 60 segundos; remover, então, a água superficial visível com um pano seco. Anotar o valor encontrado e mergulhar o corpo de prova novamente em água;
- repetir a operação a cada duas horas (considerada a leitura realizada após as primeiras 24 horas), até que em duas determinações sucessivas não se registre diferença de massa superior a 0,5% em relação ao valor anterior, anotando-se, então, sua massa saturada (m_2).

A NBR 12118 (ABNT, 2014c) indica as equações para cálculo da umidade e absorção de água, apresentadas a seguir:

- a) cálculo da porcentagem de umidade de cada bloco:

$$u \% = \frac{m_3 - m_1}{m_2 - m_1} \times 100 \quad (\text{EQUAÇÃO 03})$$

Em que:

- $u\%$: umidade do bloco no momento da entrega em laboratório (%);
- m_1 : massa do bloco seco (kg);
- m_2 : massa saturada do bloco (kg);
- m_3 : massa do bloco no momento da entrega em laboratório (kg).

b) cálculo da absorção de água:

$$a\% = \frac{m_2 - m_1}{m_1} \times 100 \quad (\text{EQUAÇÃO 04})$$

Em que:

- a%: absorção de água (%);
- m₂: massa saturada do bloco (kg);
- m₁: massa do bloco seco (kg).

Como já destacado, a determinação da área líquida acontece quando todas as seções paralelas à seção de trabalho são admitidas como iguais e constantes (FIGURA 08). O corpo de prova, depois de saturado, deve ter sua massa determinada quando imerso em água à temperatura de $(23 \pm 5) ^\circ\text{C}$, por meio de balança hidrostática, sendo o valor encontrado denominado massa aparente (m₄).

FIGURA 08 – ENSAIO DE DETERMINAÇÃO DA ÁREA LÍQUIDA



FONTE: ABCP (2013).

O cálculo da área líquida é feito mediante aplicação da seguinte equação:

$$Aliq = \frac{m_2 - m_4}{h * \gamma * 1000} \quad (\text{EQUAÇÃO 05})$$

Em que:

- Aliq: área líquida (cm²);
- m₂: massa saturada do bloco (kg);
- m₄: massa aparente do bloco (kg);
- h: altura do bloco, medida na direção perpendicular à seção de trabalho (cm);
- γ: massa específica da água utilizada no ensaio (g/m³).

O ensaio de retração é facultativo, podendo o comprador solicitar ao fornecedor essa informação, comprovada por meio de laudo de ensaio executado nos blocos de maior consumo de cimento, no máximo seis meses antes da data da entrega do produto, conforme NBR 6136 (ABNT, 2014b).

3 ORIGEM, PREPARAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DAS PARTÍCULAS DE MADEIRA

3.1 INTRODUÇÃO

Este capítulo destina-se a descrever a origem das partículas utilizadas em toda a pesquisa, assim como os procedimentos empregados no preparo e caracterização das mesmas. Estes procedimentos são válidos para todas as análises apresentadas nos capítulos 4, 5, 6, 7 e 8.

3.2 ORIGEM

Os cavacos utilizados neste trabalho são procedentes da Madeireira Maracanã situada no município de Tunas do Paraná – PR. Essa indústria produz e comercializa este produto como biomassa utilizando a espécie *Pinus* spp oriundos de florestas plantadas na região. O corte de árvores é feito do primeiro desbaste, com até oito centímetros de Diâmetro à Altura do Peito (DAP), dos reflorestamentos. Durante o processo industrial madeireiro são reduzidos a cavacos, troncos com cascas e descascados, galhos com casca e descascados, todos resultantes de ações mecânicas de descascadores e picadores. No presente estudo deu-se preferência aos cavacos com casca por serem mais baratos. O controle da faixa granulométrica nessa madeireira era feito por meio da abertura do ângulo de ataque das facas dos picadores, conforme o ângulo utilizado a madeireira obtinha os tamanhos de partículas desejados.

3.3 PREPARAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DAS PARTÍCULAS

Quando os cavacos chegaram ao Laboratório de Painéis da UFPR, possuíam teor de umidade em torno de 52,25%. Devido à necessidade da utilização dos cavacos secos para moagem procedeu-se sua secagem ao ar livre durante 48 horas (FIGURA 09A) e posteriormente em estufa, reduzindo o teor de umidade médio para aproximadamente 3% (FIGURA 09B).

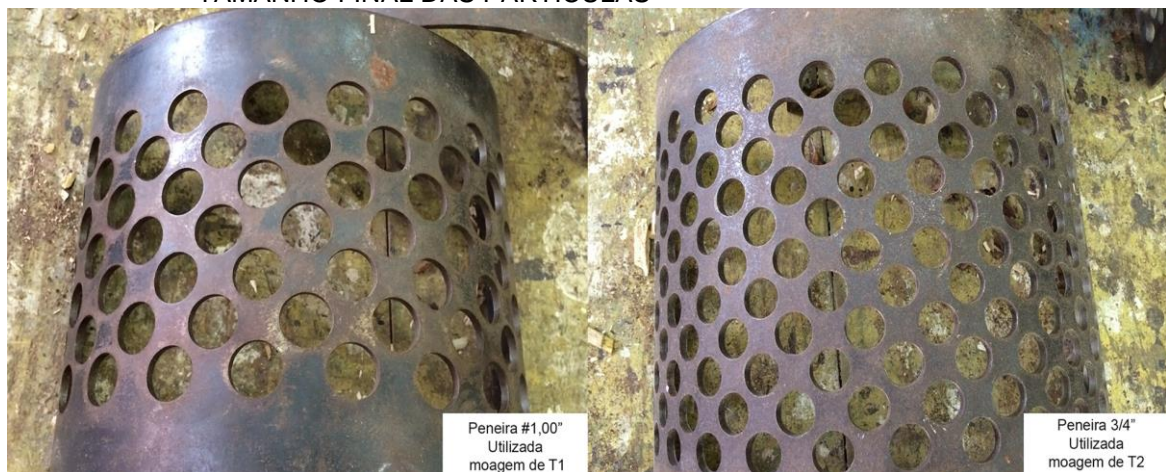
FIGURA 09 – SECAGEM DOS CAVACOS PROVENIENTES DA MADEIREIRA



FONTE: A autora (2016).

Após a secagem, os cavacos foram reduzidos em moinho de martelos, também pertencente ao Laboratório de Painéis da UFPR. No processo de moagem, utilizou-se uma peneira de 1" (2,54 cm) na saída da ação de moagem, limitando, assim, o tamanho máximo dos cavacos produzidos. Parte deles foi separada e novamente moída, mas com uma peneira de $\frac{3}{4}$ " (1,90 cm) na saída da ação de moagem, conforme observado na FIGURA 10.

FIGURA 10 – PENEIRAS UTILIZADAS NA SAÍDA DA AÇÃO DE MOAGEM PARA LIMITAR O TAMANHO FINAL DAS PARTÍCULAS



FONTE: A autora (2016).

As duas faixas granulométricas de partículas que foram geradas após a moagem foram denominadas de T1 e T2. As partículas produzidas após a primeira moagem com tamanho $< 1''$ foram denominadas de T1. As partículas com tamanho $< \frac{3}{4}''$ geradas pela segunda passagem no moinho foram denominadas de T2. Conforme pode ser observada na FIGURA 11.

FIGURA 11 – PARTÍCULAS PROVENIENTES DE REDUÇÃO EM MOINHO DE MARTELO. T1 – MATERIAL MOÍDO UMA VEZ E T2 – MATERIAL MOÍDO DUAS VEZES



FONTE: A autora (2016).

As partículas provenientes dessas moagens foram direcionadas para caracterização das faixas granulométricas na série de peneiras (FIGURA 12), no Laboratório de Materiais e Estruturas (LAME) do Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento. Para realização desse procedimento, utilizou-se a norma NBR 7211 (ABNT, 2009b), adaptada para partículas de madeira.

FIGURA 12 – FOTO A – REALIZAÇÃO DO PENEIRAMENTO PARA CARACTERIZAÇÃO DAS FAIXAS GRANULOMÉTRICAS. FOTO B – PARTE DO MATERIAL RETIDO NA PENEIRA 2,36 MM DURANTE O PROCESSO DE CARACTERIZAÇÃO GRANULOMÉTRICA



FONTE: A autora (2016).

Os materiais T1 e T2 apresentaram granulometria demonstrada na TABELA 04, em que se expressa a porcentagem retida na série de peneiras da norma NBR 7211 (ABNT, 2009b), com seu módulo de finura igual a 5,62 e 5,24, respectivamente.

TABELA 04 – PORCENTAGENS RETIDAS NAS PENEIRAS E MÓDULO DE FINURA DOS MATERIAIS T1 E T2

| Peneira | Abertura da malha (mm) | Material T1 | | Material T2 | |
|---------|------------------------|-------------|--------------------|-------------|--------------------|
| | | % Retida | % Retida Acumulada | % Retida | % Retida Acumulada |
| 1" | 25,4 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 3/4" | 19,0 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 1/2" | 12,5 | 1,01 | 1,01 | 0,00 | 0,00 |
| 3/8" | 9,5 | 14,20 | 15,21* | 1,49 | 1,49* |
| 1/4" | 6,3 | 33,47 | 48,68 | 28,56 | 30,05 |
| 4 | 4,75 | 14,20 | 62,88* | 15,29 | 45,34* |
| 8 | 2,36 | 25,76 | 88,64* | 36,55 | 81,89* |
| 16 | 1,2 | 10,14 | 98,78* | 17,05 | 98,93* |
| Fundo | - | 1,22 | 100,00 | 1,07 | 100,00 |
| | | MF = | 5,62 | MF = | 5,24 |

FONTE: A autora (2016).

NOTA: Valores com asterisco (*) foram os utilizados para cálculo do módulo de finura, conforme NBR NM 248 (ABNT, 2003)

Pode-se observar na TABELA 04 que o material moído apenas uma vez (T1) ficou com 33,47% do material retido na peneira 6,3 mm, totalizando um acumulado de

48,68%. A segunda peneira com maior quantidade de material retido foi a peneira 2,36 mm.

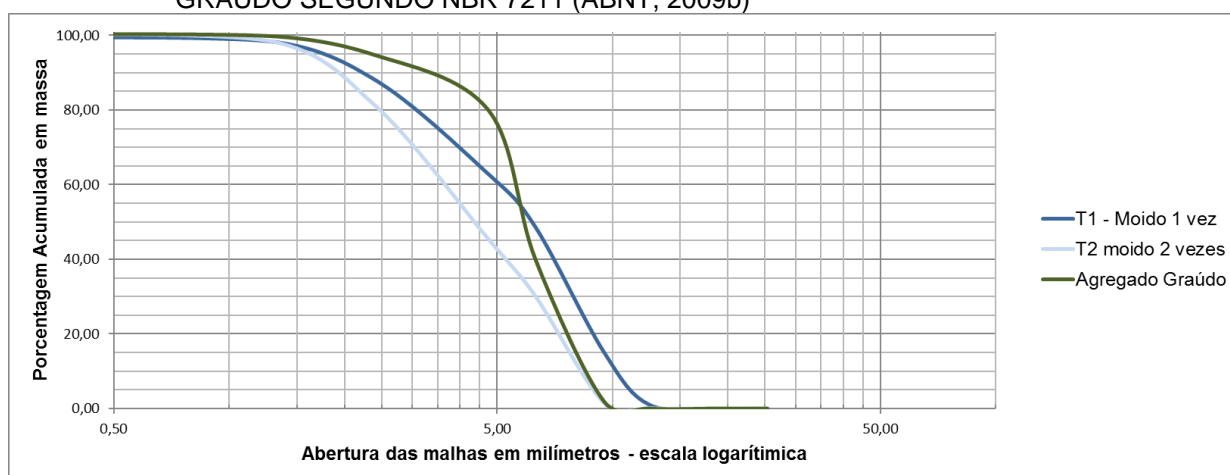
Com relação aos resultados do material moído duas vezes (T2) observou-se que a peneira com maior porcentagem de material retido foi a 2,36 mm com 36,55% das partículas, totalizando um acumulado de 81,89%.

Com base nesses resultados ressalta-se que para a produção de compósitos com partículas $\geq 9,5$ mm haveria necessidade de uma grande quantidade de material tendo em vista o tamanho original dos cavacos obtidos para este trabalho. Além disso, as partículas com tamanho $\geq 9,5$ mm limitam a utilização em formas de blocos vazados.

O material retido na peneira 1,2 mm e fundo totalizam 11,36% no material T1, e 18,12% no material T2, analogamente ao citado, para utilização deste tamanho de partícula, haveria a necessidade de grande quantidade de material para moagem.

Para caracterização das faixas granulométricas das partículas de madeira, comparativamente com a curva granulométrica dos agregados graúdos preconizado pela NBR 7211 (ABNT, 2009b) foram inseridas graficamente as três curvas observadas na FIGURA 13, a seguir, sendo: T1 material moído uma vez utilizando peneira na saída da moagem com malha de 1"; e T2 material moído pela segunda vez utilizando peneira na saída da moagem com malha de $\frac{3}{4}$ ". Ambas foram comparadas à curva granulométrica de material considerado graúdo (limite inferior) conforme NBR 7211 (ABNT, 2009b).

FIGURA 13 – COMPARATIVO DA CURVA GRANULOMÉTRICA DO MATERIAL T1, T2 E AGREGADO GRAÚDO SEGUNDO NBR 7211 (ABNT, 2009b)



FONTE: A autora (2016).

Conforme observado nas curvas granulométricas, o material T1 se aproxima mais da curva granulométrica de agregado graúdo. Sendo que o material T2 possui

material mais fino, não se encaixando entre os limites de material graúdo apresentado na NBR 7211 (ABNT, 2009b).

Após peneiramento, os materiais foram separados, de acordo com cada fração granulométrica (FIGURA 14). Inclusive os materiais T1 e T2 não peneirados foram condicionados separadamente para posterior utilização.

FIGURA 14 – COMPARAÇÃO DO TAMANHO DAS PARTÍCULAS APÓS PENEIRAMENTO



FONTE: A autora (2016).

Após essa separação granulométrica, decidiu-se por utilizar os materiais T1, T2 e os materiais retidos nas peneiras de 2,36, 4,75 e 6,3 mm, excluindo-se os materiais retidos nas peneiras 9,5 mm e 12,5 mm, pois conforme mencionado anteriormente para fabricação de blocos partículas $\geq 9,5$ mm podem não passar nas formas.

O QUADRO 02, a seguir, apresenta a nomenclatura dos materiais que foram utilizados no plano experimental, a partir deste quadro as partículas serão denominadas somente por #2,36; #4,75; #6,3; T1 e T2.

QUADRO 02 – NOMENCLATURA DOS MATERIAIS UTILIZADOS NO PLANO EXPERIMENTAL

| Nomenclatura | Dimensão das Partículas |
|--------------|------------------------------------------------------------|
| #2,36 | Passante na peneira 4,75 mm e retido na peneira de 2,36 mm |
| #4,75 | Passante na peneira 6,30 mm e retido na peneira de 4,75 mm |
| #6,3 | Passante na peneira 9,50 mm e retido na peneira de 6,3 mm |
| T1 | Material moído uma vez |
| T2 | Material moído duas vezes |

FONTE: A AUTORA (2016).

Para determinar a geometria dos materiais #2,36, #4,5 e #6,3, foram medidos o comprimento, a largura e a espessura de 100 partículas de cada fração, com o auxílio de paquímetro digital. Com o resultado dessas medições, foi possível verificar o Índice de Esbeltez (IE), calculado pela relação entre comprimento e espessura das partículas, bem como a Razão de Planicidade (RP), obtida pela relação entre largura e espessura.

Com base na equação sugerida por Moslemi (1974), foi calculada a área superficial das partículas, conforme a EQUAÇÃO 06:

$$a' = \frac{2 \times ((e \times c) + (l \times c) + (e \times l))}{c \times l \times e \times d} \text{ (cm}^2\text{/g)} \quad \text{(EQUAÇÃO 06)}$$

Em que:

- a': área superficial (cm²/g);
- e: espessura da partícula (cm);
- l: largura da partícula (cm);
- c: comprimento da partícula (cm);
- d: densidade da madeira (g/cm³), considerando o valor de 0,44 g/cm³.

Na TABELA 05 são apresentados os valores médios relativos aos dados sobre a geometria das partículas e suas respectivas áreas superficiais.

TABELA 05 – VALORES MÉDIOS DO ÍNDICE DE ESBELTEZ, RAZÃO DE PLANICIDADE E DA ÁREA SUPERFICIAL DAS DIFERENTES PARTÍCULAS

| Partícula | Comprimento (mm) | Largura (mm) | Espessura (mm) | IE | RP | a' (cm ² /g) |
|-----------|------------------|--------------|----------------|-------------------|-------------------|-------------------------|
| #2,36 | 27,07 | 3,47 | 1,98 | 9,36 ^a | 1,84 ^a | 41,47 ^a |
| #4,75 | 21,17 | 7,22 | 4,47 | 3,06 ^b | 1,75 ^a | 20,24 ^b |
| #6,3 | 30,15 | 7,94 | 4,95 | 4,01 ^b | 1,75 ^a | 17,69 ^b |

FONTE: A autora (2016).

NOTA: sendo IE, o índice de esbeltez; RP a razão de planicidade; a' = área superficial das partículas. Valores dentro de uma mesma coluna acompanhado de letras diferentes indicam diferença estatística apontada pelo teste Tukey a um nível de probabilidade de 95%.

Entre os valores médios da razão de planicidade (RP), não houve diferença estatística, o que indica que os três tipos de partículas apresentam espessuras proporcionalmente semelhantes. Porém, as partículas retidas em #2,36 mm apresentam a relação entre comprimento e largura (IE) estatisticamente superior as partículas retidas em #4,75 mm e #6,3 mm. Partículas menores tenderam a ser mais esbeltas, enquanto que as outras partículas apresentaram um menor valor de índice de esbeltez, indicando partículas mais curtas. Os valores médios sobre a área superficial seguiram o mesmo comportamento, onde as partículas menores apresentaram maior área de contato.

O índice de esbeltez (IE) é um parâmetro das partículas que pode influenciar sobre a área de contato das mesmas e, como consequência, influenciar nas propriedades mecânicas dos compósitos. Segundo VITAL et al. (1992) partículas com maior valor de índice de esbeltez, isto é, longas e finas tendem a produzir painéis com maior resistência estática e maior estabilidade dimensional. Iwakiri (2005) complementou que além de influenciar as propriedades mecânicas e dimensionais, exerce influência sobre a qualidade de acabamento e usinabilidade. Isso ocorre porque, a planicidade das partículas favorece o processo de aplicação da resina, a formação do colchão e a área de contato entre as partículas.

4 AVALIAÇÃO DOS EFEITOS DE DOSAGENS DE ÁGUA:CAL NA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL DOS COMPÓSITOS DE MADEIRA-CIMENTO COM DIFERENTES DIMENSÕES DE PARTÍCULAS.

4.1 RESUMO

Diversos estudos mostram que algumas espécies de madeira não estão aptas à produção de compósitos madeira-cimento. Isso ocorre porque os componentes orgânicos podem afetar tanto a interação entre a madeira e o cimento, quanto as interações internas do cimento. Com isso, pesquisadores vêm estudando alternativas de pré-tratamento do material de origem vegetal, uma das técnicas consiste no pré-tratamento da madeira com suspensão de Ca(OH)_2 . Esta primeira fase de pesquisa teve como objetivo avaliar a influência da quantidade de H_2O e CaO utilizada na preparação de suspensões de Ca(OH)_2 nas características mecânicas de compósitos de madeira-cimento. Foram avaliados três traços de Ca(OH)_2 , e cinco dimensões de partículas de *Pinus spp* oriundas de resíduos de madeira, por meio da realização de ensaios de compressão axial em corpos de prova cilíndricos. Os resíduos foram secos em estufa, apresentando uma umidade de 3%, sem tratamento. A relação cimento: madeira foi de 1:1,5, em massa. As relações água:cal para produção de Ca(OH)_2 foram 4,7:1; 6,25:1 e 7,8:1. As médias de resistências à compressão axial obtidas mostraram que os compósitos produzidos com a relação água:cal de 6,25:1 apresentou valores estatísticos mais altos quando comparados aos compósitos produzidos com outras relações de água:cal.

4.2 INTRODUÇÃO

Vários fatores influenciam as propriedades de compósitos de madeira-cimento, como a presença de inibidores da cura do cimento no material orgânico (os extrativos da madeira). Devido a isso, muitos pesquisadores vêm estudando alternativas de pré-tratamento do material de origem vegetal, sendo recomendada a incorporação de aditivos químicos, que restringem a inibição da madeira, melhorando, dessa forma, as propriedades dos compósitos de madeira-cimento.

Segundo Wei, Min e Tomita (2000), um grupo de aditivos recomendado é o dos cloretos (CaCl_2 , FeCl_3 e SnCl_2), que misturados em uma quantidade de 4% em relação ao peso do cimento melhoram as propriedades mecânicas dos compósitos. Contudo,

de acordo com Neville e Brooks (2013), há discordância entre os pesquisadores sobre o uso dos cloretos, uma vez que podem induzir a corrosão do aço em concretos armados, com isso, passou-se a avaliar sua proporção máxima em relação ao peso do cimento. Outro efeito indesejável seria o aumento da retração e fluência. No mesmo sentido, de acordo com a NBR 6118 (ABNT, 2014a), não é permitido o uso de aditivos contendo cloreto na sua composição em estruturas de concreto armado. De forma similar, a ACI 318R-05 (ACI, 2005) recomenda limites baixos de cloreto, bem como proíbe o uso de aditivos com cloreto em concreto que contenha armadura.

Outra alternativa para melhorar as propriedades mecânicas dos compósitos de madeira-cimento é o uso do Ca(OH)_2 . Por exemplo, na pesquisa de Fan et al. (2012) utilizando 15 espécies de madeira tropical, a compatibilidade entre madeira e cimento foi menos eficiente nas madeiras com pré-tratamento de CaCl_2 e melhorou significativamente com o pré-tratamento utilizando Ca(OH)_2 .

Karade, Irle e Maher (2006) sugerem duas maneiras de tratar as partículas com Ca(OH)_2 , são elas: imersão em solução seguida de lavagem das partículas e imersão sem lavagem, que acarreta a incorporação do cálcio na madeira. Segundo os autores, o uso da imersão em solução de 1% de Ca(OH)_2 por uma hora mostrou-se mais eficaz que a imersão em água fria e quente nas partículas com tamanho abaixo de 1 mm. Por sua vez, nos ensaios realizados por Parchen (2012), os compósitos com partículas de *Pinus* spp imersas em solução de Ca(OH)_2 por uma hora e que, subsequentemente, secaram ao ar sem ser lavadas apresentaram incremento nos ensaios de compressão axial quando comparados aos corpos de prova compostos por partículas lavadas após extração com Ca(OH)_2 . De acordo com o autor, os materiais não lavados criam uma cobertura mineral sobre a superfície da partícula, que, após a secagem, age como bloqueio físico entre os extrativos e o cimento.

Outro fator que influencia as propriedades dos compósitos de madeira-cimento é a dimensão das partículas utilizadas. Conforme Olorunnisola (2009), a resistência à flexão em painéis de madeira-cimento está diretamente relacionada ao grau de ligação entre as partículas de madeira e o cimento, dependendo essa ligação das dimensões das partículas utilizadas. Ainda, o estudo de Badejo (1988) indicou que a geometria da partícula é altamente correlacionada com propriedades importantes, como o módulo de ruptura e módulo de elasticidade à flexão estática, e a ligação interna. Já as pesquisas de Semple e Evans (2004) indicaram que as partículas longas

devem ser usadas no lugar das pequenas, quando o objetivo for placas com alta resistência mecânica (MOR e MOE). Por fim, na revisão de literatura feita por Frybort et al. (2008), existe a indicação de que a diminuição do tamanho das partículas, além de consumir mais energia, aumenta o consumo de adesivo, devido à maior área superficial específica.

4.2.1 Objetivo

O objetivo desta etapa dos estudos foi avaliar a influência da quantidade de H₂O e CaO empregada na produção de suspensão de Ca(OH)₂ utilizada para pré-tratamento das partículas de madeira, por meio das propriedades físicas e mecânicas de corpos de prova de compósitos de madeira-cimento curados, adotando diferentes dimensões de partículas.

4.3 MATERIAIS E MÉTODOS

Foram utilizados cavacos de *Pinus* spp, procedentes de uma madeireira localizada no município de Tunas do Paraná, obtidos por meio de ações mecânicas de descascadores e picadores, comercializados como biomassa.

4.3.1 Preparação das partículas

Uma vez disponibilizado pela madeireira os cavacos foram levados ao Laboratório de Painéis da UFPR. Os cavacos com casca possuíam teor de umidade em torno de 52,25%, devido à necessidade da utilização dos cavacos secos para moagem procedeu-se sua secagem ao ar livre por um período de 48 horas; e posteriormente em estufa, reduzindo o teor de umidade médio para aproximadamente 3%.

Depois de secos, os materiais foram reduzidos em moinho de martelos no laboratório de painéis. Após a moagem, as partículas foram classificadas em peneiras do LAME sendo selecionadas aquelas que passaram na peneira 4,75mm e ficaram retidas nas peneiras de 2,36 mm; passaram na peneira 6,3 mm e ficaram retidas na peneira 4,75 mm e as que passaram na peneira 9,5 mm e ficaram retidas na peneira 6,3 mm. Conforme FIGURA 15 a seguir:

FIGURA 15 – PARTÍCULAS UTILIZADAS PARA PRODUÇÃO DOS CORPOS DE PROVA



FONTE: A autora (2016).

Para os estudos propostos neste capítulo, além dos materiais retidos nas peneiras #2,36; #4,75 e #6,3; utilizou-se parte do material antes de ser peneirado (T1 e T2). A nomenclatura dos materiais pode ser verificada no QUADRO 2 (página 76), apresentado anteriormente no capítulo 3.

4.3.2 Aglomerantes

Para a adesão das partículas de madeira utilizadas na produção dos corpos de prova dos compósitos de madeira-cimento, utilizou-se aglomerante hidráulico. Nesta pesquisa, o aglomerante utilizado foi o Cimento Portland CP II-Z, que contém adição de material pozolânico, variando de 6% a 14% em massa, o que confere ao cimento menor permeabilidade. Também pode conter adição de material carbonático (fíler) no limite máximo de 10% em massa. A norma brasileira que trata desse tipo de cimento é a NBR 11578 (ABNT, 1997a).

De fácil aquisição, com disponibilidade permanente, o cimento Portland CP II-Z foi adquirido em sacos de 50 kg em mercado fornecedor de materiais para construção civil. A opção pelo uso do cimento CP II-Z em substituição ao cimento de alta resistência inicial CP-V foi determinada pela busca de um processo mais simples para a obtenção dos compósitos de madeira-cimento.

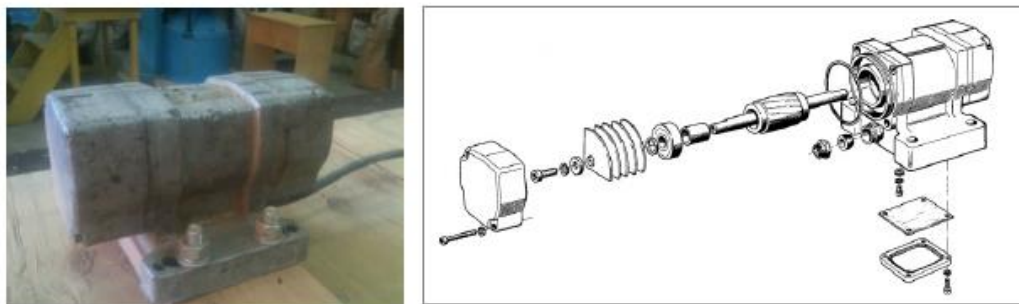
Também se utilizou um aglomerante aéreo, que detém mecanismo de adesão e endurecimento com reação química em presença do ar. Nesta pesquisa, adotou-se a cal aérea ou óxido de cálcio (CaO), conhecida pelo mercado consumidor como cal

virgem. O óxido de cálcio para ser utilizado foi hidratado, resultando dessa reação o hidróxido de cálcio Ca(OH)_2 conhecido como cal hidratada.

4.3.3 Equipamentos

Para produção dos corpos de prova dos compósitos de madeira-cimento, foi utilizada uma mesa vibratória do Laboratório de Painéis da UFPR, desenvolvida por Parchen (2012) e formada por um vibrador elétrico trifásico Würges, com ajuste mecânico dos excêntricos promotores da energia de vibração, com carga de impacto vertical equivalente a 220 N e rotação de 3.000 RPM, acoplada a uma prancha de compensado flexível, conforme FIGURA 16.

FIGURA 16 – FOTO E ESQUEMA DO VIBRADOR UTILIZADO NA MESA VIBRATÓRIA DE 220 N



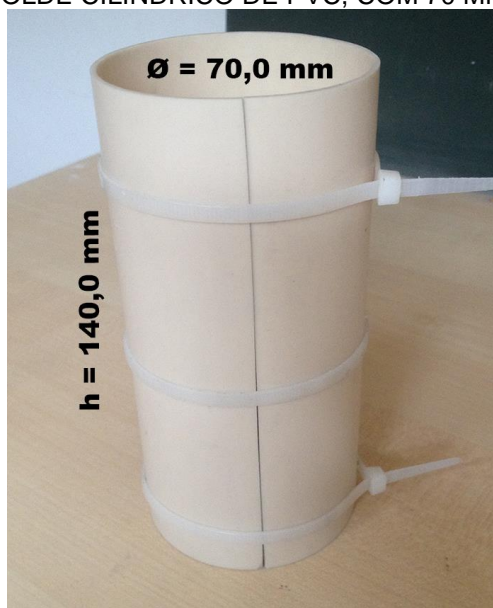
FONTE: CASTRO (2015, p.117).

Também foram empregados micrômetros, balanças e moinho de martelos, pertencentes ao mesmo laboratório. Para o processo de peneiramento, a máquina utilizada foi uma peneira vibratória, que se encontra no LAME.

4.3.4 Moldes para os corpos de prova

Para atendimento a norma NBR 5738 (ABNT, 2008b), foram construídos moldes cilíndricos com tubos de PVC. Os moldes apresentavam dimensões de 70 mm de diâmetro e 140 mm de altura, para ensaio de resistência à compressão axial, possuindo um volume interno líquido de $538,8 \text{ cm}^3$ e abertura ao longo da geratriz, fechados por cintas plásticas para facilitar o desmolde, como mostrado na FIGURA 17.

FIGURA 17 – MOLDE CILÍNDRICO DE PVC, COM 70 MM DE DIÂMETRO



FONTE: A autora (2016).

4.3.5 Manufatura dos corpos de prova

Para produção dos corpos de prova adotou-se, como traços dos compósitos de madeira-cimento, 130 g de cimento e 100 g de resíduo de madeira. Como a umidade da madeira chegava a 15%, a relação madeira:cimento foi de 1:1,5 e, em virtude da presença de água da suspensão $\text{Ca}(\text{OH})_2$, foi utilizado uma adição de água igual a 30% do peso seco do cimento, isto é, 39 g de água para cada 130 g de cimento. Ainda, para confecção dos corpos de prova, utilizou-se a mesa vibratória do Laboratório de Painéis.

Nesta etapa da pesquisa, os tratamentos diferiram entre si devido à variação da dimensão das partículas da madeira e à relação água:cal na formação da suspensão de $\text{Ca}(\text{OH})_2$; por outro lado, as relações madeira:cimento (1:1,5) e adição de água (30%) foram mantidas fixas.

O delineamento experimental consistiu de 15 tratamentos, tendo sido confeccionados sete corpos de prova para cada tratamento, totalizando 105 corpos de prova, conforme apresentado no QUADRO 03 a seguir.

QUADRO 03 – DELINEAMENTO EXPERIMENTAL

| Tratamento | Vibração | Água:cal (massa) | Dimensão das Partículas |
|------------|----------|---------------------|----------------------------|
| 111 | 220 N | 4,7 : 1 | #2,36 |
| 112 | | | #4,75 |
| 113 | | | #6,3 |
| 114 | | | T1 |
| 115 | | | T2 |
| 121 | 220 N | 6,25 : 1 | #2,36 |
| 122 | | | #4,75 |
| 123 | | | #6,3 |
| 124 | | | T1 |
| 125 | | | T2 |
| 131 | 220 N | 7,8 : 1 | #2,36 |
| 132 | | | #4,75 |
| 133 | | | #6,3 |
| 134 | | | T1 |
| 135 | | | T2 |

FONTE: A autora (2016).

O método empregado na produção dos corpos de prova foi sugerido nos estudos de Parchen (2012), onde o CaO foi hidratado, resultando dessa reação uma suspensão de Ca(OH)_2 , conhecido como cal hidratada, utilizada para o pré-tratamento das partículas. O processo de carbonatação a frio sobre as partículas de madeira é possível devido a reversibilidade da reação conhecida como ciclo da cal. O minério é encontrado na natureza como carbonato de cálcio (CaCO_3), na indústria produtora de cal, por ação de fornecimento de calor, desenvolve-se a reação de descarbonização do carbonato de cálcio, tornando-se óxido de cálcio (CaO) ou cal virgem.

Foram preparados três grupos de Ca(OH)_2 , em que utilizou-se CaO com grau de pureza de 80% (valor informado pelo fabricante) e água potável, ocorrendo uma reação exotérmica entre os componentes. As três suspensões preparadas de Ca(OH)_2 , seguiram as seguintes proporções: Grupo-4,7 apresentava 4,7 partes de água para uma parte de CaO, em massa (4,7:1); Grupo-6,25 apresentava 6,25 partes de água para uma parte de CaO em massa (6,25:1); e Grupo-7,8, sendo 7,8 partes de água para uma parte de CaO em massa (7,8:1).

Conforme apresentado no delineamento experimental, os tratamentos 111, 112, 113, 114 e 115 foram produzidos com a suspensão de Ca(OH)_2 do grupo com relação água:cal igual a 4,7:1. Os tratamentos 121, 122, 123, 124 e 125 foram

produzidos com a suspensão de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ do grupo 6,25:1 (água:cal). E finalmente os tratamentos 131, 132, 133, 134 e 135 foram produzidos com a suspensão de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ do grupo 7,8:1 (água:cal), sendo produzidos 7 corpos de prova para cada tratamento. Conforme QUADRO 04 a seguir:

QUADRO 04 – CARACTERÍSTICAS DOS GRUPOS DE $\text{Ca}(\text{OH})_2$ UTILIZADOS NESTA ETAPA DOS EXPERIMENTOS

| Grupo | Relação Água:Cal | Partes em massa | | Número de Corpos de Prova |
|--------|------------------|------------------|-----|---------------------------|
| | | H ₂ O | CaO | |
| G-4,7 | 4,7:1 | 4,7 | 1 | 35 |
| G-6,25 | 6,25:1 | 6,25 | 1 | 35 |
| G-7,8 | 7,8:1 | 7,8 | 1 | 35 |

FONTE: A autora (2016).

Terminada a reação exotérmica entre a água e o CaO, o $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ficou em processo de complementação da reação de hidratação e resfriamento por 24 horas, em temperatura ambiente. Utilizando a massa atômica dos elementos contidos na CaO, foi possível determinar a quantidade de H₂O necessária para a reação de hidratação sendo está igual a 22,4% da água utilizada na preparação da suspensão.

A suspensão alcalina de hidróxido de cálcio obtida, com pH 12, foi adicionada às partículas de madeira durante a mistura, resultando em um pré-tratamento da madeira. A reversibilidade do processo se completa quando o dióxido de carbono CO₂ presente na atmosfera, se combina novamente com o hidróxido de cálcio, durante a fase de carbonatação ou secagem, se transformando quimicamente em (CaCO₃) que mineraliza a superfície externa da partícula de madeira, apresentada na FIGURA 18 .

FIGURA 18 – PARTÍCULAS SEM PRÉ-TRATAMENTO (ESQ), PARTÍCULAS COM SUPERFÍCIE CARBONATADA (DIR)



FONTE: A autora (2016).

A confecção dos corpos de prova cilíndricos baseou-se na norma NBR 5738 (ABNT, 2008b), que é utilizada para o procedimento de moldagem e cura de corpos de prova de concreto de cimento Portland. A quantidade de cada material para a produção dos corpos de prova encontra-se apresentada no QUADRO 05.

QUADRO 05 – MATERIAIS UTILIZADOS PARA CONFECÇÃO DE SETE CORPOS DE PROVA

| Material | Quantidade |
|--------------------------------|-------------------|
| Cimento | 1.612 g |
| Resíduo de <i>Pinus</i> | 1.240 g |
| Suspensão de Ca(OH)_2 | 1.240 g |
| Água | 483,6 g |

FONTE: A autora (2016).

Para a mistura dos ingredientes, colocou-se as partículas de resíduo em uma bandeja misturadora de materiais (utilizada na construção civil) e o mesmo peso de suspensão de Ca(OH)_2 , consistindo em um pré-tratamento das partículas. Após o período de 15 minutos, foram adicionados o cimento e a água, sendo todos os materiais misturados manualmente até a completa homogeneização, isto é, quando todas as superfícies laterais das partículas apresentaram-se revestidas pela pasta de cimento e água.

Após a mistura, os moldes cilíndricos foram preenchidos em três fases, sendo, em cada uma delas, submetidos à vibração com o auxílio da mesa vibratória por 30 segundos. Desse modo, o adensamento ocorreu por compactação vibrodinâmica. Os moldes, após terem seu volume total preenchido, foram cobertos por uma tampa circular produzida de MDF que possuía 70 mm de diâmetro e 3 mm de espessura, o qual servia de forma e mantinha o corpo de prova reto, conforme apresentado na FIGURA 19.

FIGURA 19 – MOLDES CILÍNDRICOS EM PVC PREENCHIDOS PELO COMPÓSITO MADEIRA-CIMENTO TAMPADO POR PEÇA CIRCULAR EM MDF E FECHADO LATERALMENTE POR CINTAS PLÁSTICAS



FONTE: A autora (2016).

Após a modelagem, os corpos de prova foram submetidos a cura em lugar seco e ventilado, abrigado da luz solar. Decorridas 48 horas, os moldes de PVC cilíndricos foram abertos sem aplicação de esforço sobre as superfícies dos corpos de prova e terminaram sua cura de 28 dias no laboratório, sobre uma superfície horizontal rígida em local protegido de intempéries, respeitando as condições ditadas pela NBR 5738 (ABNT, 2008b). Na FIGURA 20, estão apresentadas fotos dos corpos de prova após 28 dias de cura.

FIGURA 20 – FOTO DOS CORPOS DE PROVA DESENFORMADOS APÓS 28 DIAS DE CURA



FONTE: A autora (2016).

4.3.6 Determinação das propriedades mecânicas

Para a determinação das propriedades mecânicas dos corpos de prova, estes foram submetidos a ensaios de compressão axial, utilizando-se as máquinas de ensaios do Laboratório de Tecnologia da Madeira da UFPR (FIGURA 21). Conforme a norma NBR 5739 (ABNT, 2007), os ensaios foram realizados ao final do período de 28 dias de cura.

FIGURA 21 – ENSAIO DE COMPRESSÃO AXIAL NOS CORPOS DE PROVA APÓS 28 DIAS DE CURA, CONFORME NBR 5739



FONTE: A autora (2016).

4.3.7 Análise estatística

Os resultados obtidos pelos ensaios realizados durante o estudo desta etapa tiveram sua análise feita por meio do *software* Statgraphics Centurion XV, versão 15.2.11. O delineamento experimental foi inteiramente casualizado, com arranjo fatorial para os tratamentos visando avaliar a interação entre dois fatores, relação água:cal e dimensão das partículas.

O método adotado foi a análise da variância, em que foi verificada a normalidade dos valores; quando da apresentação de diferenças significativas nas variâncias, adotou-se como procedimento para comparação de médias o Tukey-Kramer ao nível de probabilidade de 95%, utilizando o mesmo *software*.

4.4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos nos experimentos realizados nesta etapa encontram-se na TABELA 06. Foram elencados os valores médios obtidos na avaliação das propriedades físicas e mecânicas (densidade aparente e resistência à compressão axial) nas diferentes relações de água:cal e dimensões de partículas.

Para facilitar o entendimento das discussões apresentadas neste capítulo os experimentos foram diferenciados nos três grupos, G-4,7; G-6,25 e G-7,8 mencionados anteriormente.

TABELA 06 – RESULTADO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DOS CORPOS DE PROVA DOS COMPÓSITOS MADEIRA-CIMENTO, OBTIDAS NOS ENSAIOS PARA OS 15 TRATAMENTOS

| Tratamento | Relação Água:Cal (Massa) | Dimensão das Partículas | Densidade Aparente (g/cm ³) | Resistência à compressão Axial (MPa) |
|------------|--------------------------------|----------------------------|-----------------------------------------------|-----------------------------------------|
| T111 | 4,7:1 (Grupo G-4,7) | #2,36 | 0,51 (4,7%) | 0,71 (27,0%) |
| T112 | | #4,75 | 0,54 (2,7%) | 0,82 (23,0%) |
| T113 | | #6,3 | 0,59 (8,9%) | 0,73 (30,0%) |
| T114 | | T1 | 0,59 (5,1%) | 0,62 (34,0%) |
| T115 | | T2 | 0,62 (2,6%) | 0,55 (8,0%) |
| T121 | 6,25:1 (Grupo G-6,25) | #2,36 | 0,63 (5,6%) | 1,62 (13,0%) |
| T122 | | #4,75 | 0,64 (5,7%) | 1,36 (11,0%) |
| T123 | | #6,3 | 0,59 (5,2%) | 1,11 (10,0%) |
| T124 | | T1 | 0,61 (4,4%) | 1,01 (21,0%) |
| T125 | | T2 | 0,63 (2,5%) | 1,36 (12,0%) |
| T131 | 7,8:1 (Grupo G-7,8) | #2,36 | 0,63 (3,9%) | 1,37 (8,0%) |
| T132 | | #4,75 | 0,61 (6,2%) | 1,22 (13,0%) |
| T133 | | #6,3 | 0,60 (6,4%) | 1,00 (20,0%) |
| T134 | | T1 | 0,66 (4,5%) | 1,33 (18,0%) |
| T135 | | T2 | 0,63 (2,4%) | 1,05 (10,0%) |

FONTE: A autora (2016).

NOTA: Valores entre parênteses indicam o coeficiente de variação.

Os ensaios axiais de compressão são considerados por Mehta e Monteiro (2008) parâmetro universalmente aceito como índice de referência da resistência do compósito ensaiado, quando o cimento é utilizado como aglomerante. Todos os corpos de prova apresentaram densidade aparente menor que 0,66 g/cm³, ou seja, valor bem inferior ao de blocos de concreto para vedação, encontrados no mercado, que é de 2,1g/cm³. Assim de acordo com a NBR 12655 (ABNT, 2006) podem ser considerados compósitos leves.

Por sua vez, os valores médios encontrados para a resistência à compressão axial são superiores aos encontrados na pesquisa realizada por Parchen (2012), onde o valor médio de resistência à compressão axial foi de 0,52 MPa. Nos estudos de Parchen (2012), a densidade aparente média dos tratamentos foi de 0,60 a 0,74 g/cm³.

Observando-se a TABELA 06 ficou evidente a ocorrência de correlação entre a densidade aparente dos corpos de prova dos compósitos e os valores encontrados

para a resistência à compressão axial. Visando eliminar essa fonte de variação, destaca-se que, para ajustar os valores de densidade aparente, no presente estudo, a densidade aparente dos corpos de prova foi tratada como uma covariável durante a análise estatística, apresentada a seguir.

Na TABELA 07 são apresentados os resultados da análise de variância dos dados da variável resistência à compressão axial e os valores de Qui-Quadrado referente ao teste de Bartlett. Pode-se observar que a variável analisada apresentou variância dos tratamentos homogênea, não requerendo transformação dos dados.

TABELA 07 – ANÁLISE DE VARIÂNCIA PARA TAMANHO DA PARTÍCULA E QUANTIDADE DE CAL

| Fonte de variação | SQ | Grau de liberdade | Quadrado médio | F | P |
|-----------------------------|--------|-------------------|---------------------|--------|----------|
| Covariável – densidade | 2,2326 | 1 | 2,2326 | 101,83 | 0,0000** |
| A: relação água:cal | 1,9396 | 2 | 0,9698 | 44,23 | 0,0000** |
| B: tamanho das partículas | 2,2676 | 4 | 0,5668 | 25,86 | 0,0000** |
| Coeficiente de variação (%) | | | 12,51 | | |
| Qui-quadrado | | | 19,25 ^{ns} | | |

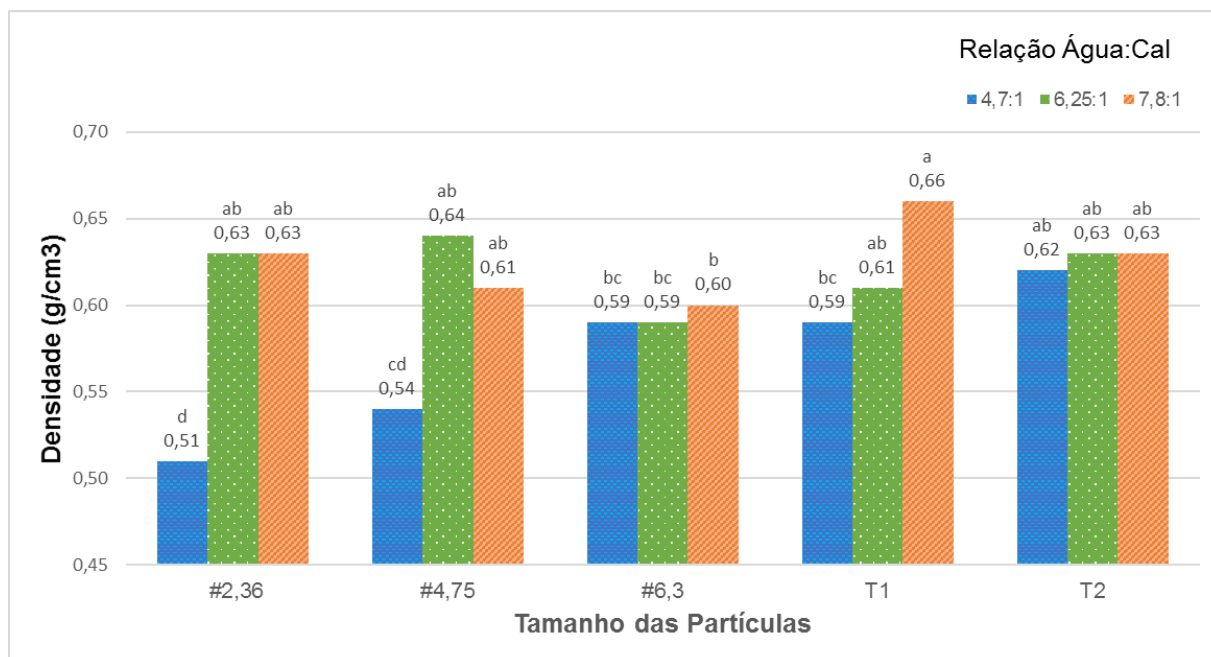
FONTE: A autora (2016).

NOTAS: ns = não significativo. ** = significativo a 1% de probabilidade.

Na análise dos resultados da TABELA 07, observa-se que a utilização da densidade como covariável foi estatisticamente significativa ($p < 0,01$). Os fatores principais 'relação água:cal' e 'tamanho das partículas', também apresentaram diferenças estatísticas significantes ($p < 0,01$), indicando que existe diferença entre as unidades experimentais, como se supunha. A variável tamanho da partícula será objeto do próximo capítulo.

A FIGURA 22 apresenta os valores médios encontrados para a densidade aparente (g/cm^3), comparando os tamanhos das partículas de madeira nos três grupos G-4,7; G-6,25 e G-7,8.

FIGURA 22 – VALORES MÉDIOS DAS DENSIDADES APARENTES DOS CORPOS DE PROVA DOS COMPOSTOS SEPARADO POR DIMENSÃO DAS PARTÍCULAS E GRUPOS DE RELAÇÃO ÁGUA:CAL



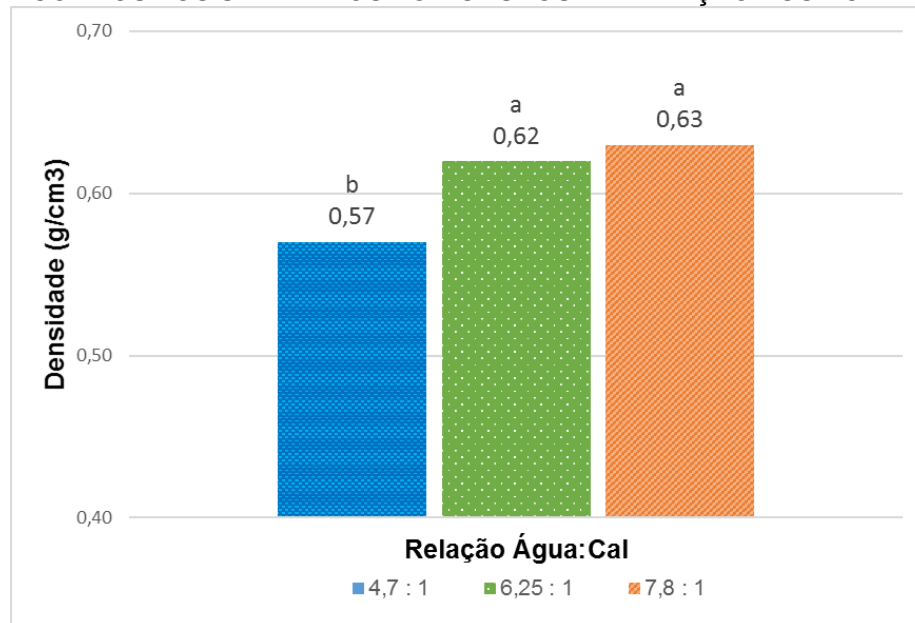
FONTE: A autora (2016).

NOTA: Letras diferentes acima de colunas da mesma cor representam a diferença estatística encontrada no teste de média de Tukey a um nível de confiança de 95%.

Conforme FIGURA 22 os tratamentos que utilizaram relação água:cal igual a 4,7:1 apresentaram valores menores de densidade aparente para corpos de prova produzidos com partículas menores (#2,36 e #4,75). Por sua vez, para os tratamentos com relação água:cal de 6,25:1 e 7,8:1 não houve diferença estatística entre as frações granulométricas estudadas.

Na FIGURA 23 apresentam-se os valores médios da densidade aparente dos corpos de prova considerando todos os tamanhos de partículas.

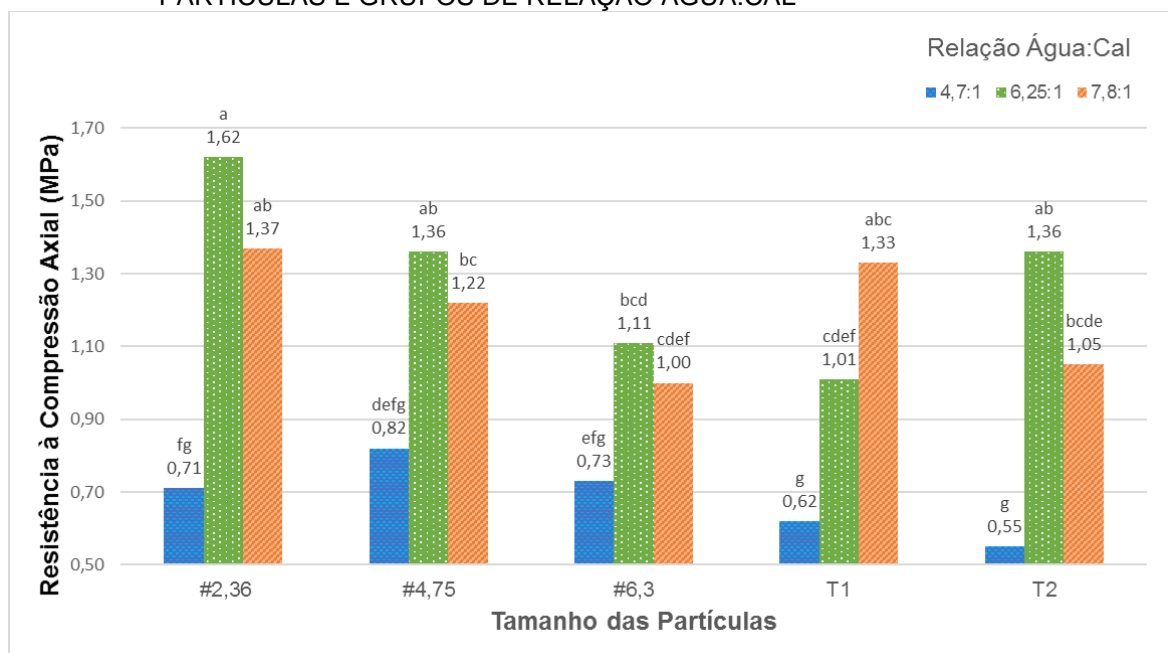
FIGURA 23 – VALORES MÉDIOS DAS DENSIDADES APARENTES DOS CORPOS DE PROVA DOS COMPOSTOS SEPARADOS POR GRUPOS DE RELAÇÃO ÁGUA:CAL



FONTE: A autora (2016).

A FIGURA 24 apresenta os valores médios da resistência à compressão axial, em cada tamanho de partícula, para os três grupos de relação água:cal, acompanhados pelas letras que indicam a diferença estatística obtida pelo teste de médias de Tukey.

FIGURA 24 – VALORES MÉDIOS PARA A RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL DOS CORPOS DE PROVA DOS COMPOSTOS DE MADEIRA-CIMENTO, POR DIMENSÃO DAS PARTÍCULAS E GRUPOS DE RELAÇÃO ÁGUA:CAL



FONTE: A autora (2016).

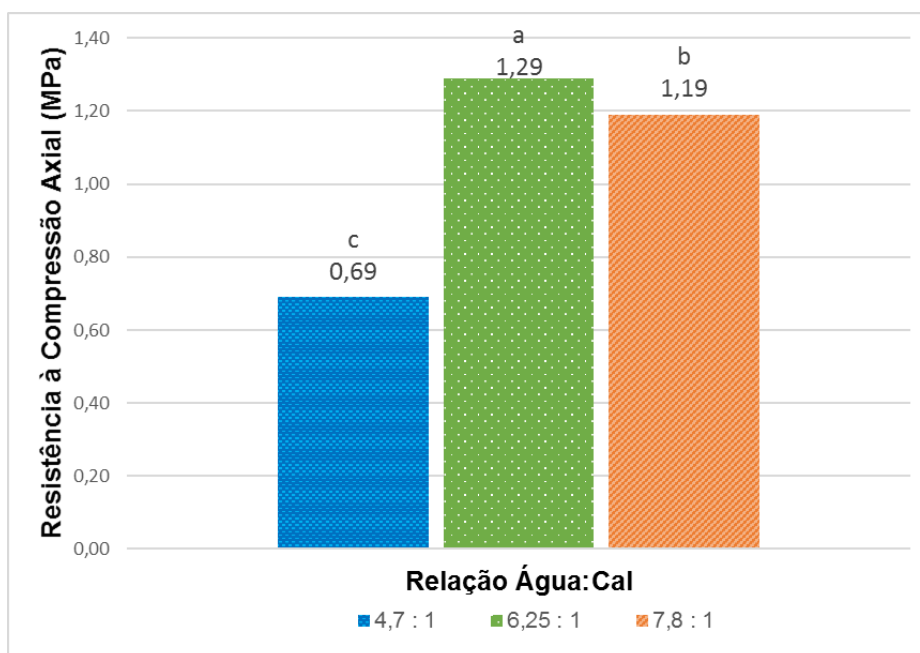
NOTA: Letras diferentes acima de colunas da mesma cor representam a diferença estatística encontrada no teste de média de Tukey a um nível de confiança de 95%.

Os compósitos produzidos com relação água:cal de 6,25:1 são estatisticamente iguais quando utilizadas as partículas #2,36; #4,75 e partículas T2. Nos compósitos com relação 7,8:1 os compósitos utilizando as partículas #2,36; #4,75 e partículas T1 são estatisticamente iguais.

Os corpos de prova dos compósitos produzidos com relação água:cal de 4,7:1 apresentaram valores médios menores que as outras relações, em todas as dimensões de partículas estudadas.

A FIGURA 25 apresenta um resumo dos valores de resistência à compressão axial dos corpos de prova, separados por grupos de relação água:cal, sem a divisão por tamanho de partículas.

FIGURA 25 – VALORES MÉDIOS PARA A RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL DOS CORPOS DE PROVA DOS COMPÓSITOS DE MADEIRA-CIMENTO, POR GRUPOS DE RELAÇÃO ÁGUA:CAL



FONTE: A autora (2016).

Ao comparar a FIGURA 23 com a FIGURA 25 verifica-se que o grupo G-4,7 (relação água:cal igual a 4,7:1) apresenta valores médios de densidade aparente menores, assim como valores de resistência a compressões axiais também menores que os outros dois grupos, o que indica que valores menores de resistência à compressão estão intimamente ligados a menores valores de densidade aparente dos corpos de prova.

Conforme mencionado anteriormente, a densidade foi confirmada como uma covariável significativa. Consequentemente o teste de Tukey foi conduzido com valores ajustados para uma densidade específica média. As médias de resistência à compressão axial em MPa corrigidas pela covariável densidade são apresentadas na TABELA 08, sendo possível analisar os resultados para as três relações água:cal, considerando todas as dimensões de partículas.

TABELA 08 – VALORES MÉDIOS PARA A PROPRIEDADE MECÂNICA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL DOS CORPOS DE PROVA DOS COMPÓSITOS DE MADEIRA-CIMENTO UTILIZANDO TODOS OS TAMANHOS DE PARTÍCULAS

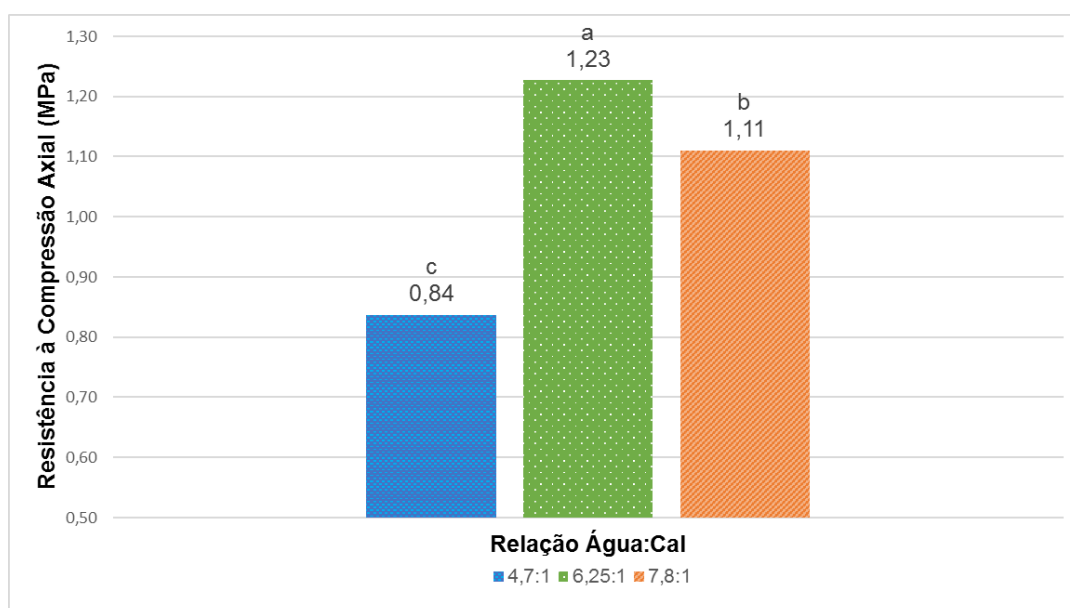
| Água:cal | Média das tensões |
|----------|---------------------|
| 4,7:1 | 0,8374 ^c |
| 6,25:1 | 1,2267 ^a |
| 7,8:1 | 1,1095 ^b |

FONTE: A autora (2016).

NOTA: Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade.

Na FIGURA 26 são comparadas as médias da propriedade mecânica resistência à compressão axial considerando as três relações de água:cal estudadas (G-4,7; G-6,25 e G-7,8). Na análise foram consideradas todas as dimensões de partículas, tendo sido considerada a densidade um fator covariante.

FIGURA 26 – VALORES MÉDIOS PARA A PROPRIEDADE MECÂNICA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL DOS CORPOS DE PROVA DOS COMPÓSITOS DE MADEIRA-CIMENTO PARA OS TRÊS GRUPOS DE RELAÇÃO ÁGUA:CAL



FONTE: A autora (2016).

Os três tratamentos apresentaram valores médios de resistência à compressão axial distintos. Os corpos de prova dos compósitos de madeira-cimento produzidos utilizando-se a relação água:cal 6,25:1 apresentaram um valor médio de resistência à compressão axial (1,23 Mpa) estatisticamente superior a relação 7,8:1 e 4,7:1. Sendo que este apresentou um valor médio inferior às demais relações.

4.5 CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos neste capítulo, podem-se apresentar as seguintes conclusões:

- Compósitos com baixa densidade aparente apresentaram menores valores de resistência à compressão axial;
- A escolha da relação água:cal para tratamento das partículas pode ser correlacionada com a dimensão das partículas de madeira;
- O uso da relação água:cal de 6,25:1 resultou em compósitos com maiores valores de resistência à compressão axial, seguido pela relação água:cal de 7,8:1;
- Apesar do grupo com relação água:cal de 7,8:1 não possuir maiores médias de resistência à compressão axial, este deve ser avaliado com base na dimensão da partícula utilizada. Pelo fato de na utilização das partículas tipo T1, esta relação apresentou maiores médias de resistência à compressão axial.

5 AVALIAÇÃO DA INTERAÇÃO ENTRE OS FATORES DIMENSÃO DE PARTÍCULAS E VELOCIDADE DA MESA VIBRATÓRIA NA RESISTÊNCIA DO COMPÓSITO DE MADEIRA-CIMENTO

5.1 RESUMO

O presente capítulo visa avaliar o efeito da interação entre os fatores dimensão das partículas de madeira de *Pinus* spp e a velocidade de vibração utilizada na confecção de corpos de prova de madeira-cimento. Para tanto, foram produzidos corpos de prova para ensaio de compressão axial com cinco diferentes dimensões de partículas e realizados testes com duas velocidades de moldagem por vibração.

Nos ensaios de resistência à compressão axial, os resultados indicaram que as partículas menores, retidas na peneira de 2,36 mm, apresentam melhores resultados quando comparadas às outras dimensões de partículas. Quanto à vibração, os corpos de prova dos compósitos de madeira-cimento produzidos com velocidade 220 N apresentaram valores maiores de resistência à compressão em relação aqueles produzidos com velocidade 440 N.

5.2 INTRODUÇÃO

Diversos estudos apontam para o fato de a geometria da partícula estar relacionada com as propriedades-chave dos compósitos de madeira-cimento, tais como: o módulo de ruptura e de elasticidade à flexão estática, a resistência à compressão axial e o inchamento. Nesse sentido, os resultados do trabalho de Parchen (2012) apontaram, tanto nos ensaios físicos quanto nos mecânicos, a influência da dimensão das partículas no comportamento dos compósitos. Também Yamada (2002) ressalta que os parâmetros da geometria da partícula, a organização e o processamento desempenham um papel importante nas propriedades físicas e mecânicas dos compósitos.

Badejo (1988) observou que placas produzidas com partículas de elevado índice de esbeltez apresentaram melhor estabilidade dimensional. Semple e Evans (2004) confirmam essa conclusão ao afirmar que as partículas mais longas devem ser utilizadas quando o objetivo é a produção de placas mais resistentes. Isso também é demonstrado nos estudos de Iwakiri (1989), em que a resistência mecânica à flexão estática melhorou utilizando partículas mais longas. Ainda, Barnes (2001) verificou

que a partícula de madeira, além de possuir rigidez, deve ser suficientemente longa para permitir sobreposição, de maneira que a tensão aplicada sobre uma possa ser transferida para outra. Da mesma forma, Ma et al. (2000) verificaram em seus estudos que placas utilizando partículas mais esbeltas tendem a apresentar valores mais elevados de módulo de elasticidade à flexão estática, em relação a placas feitas a partir de partículas mais grossas.

Além da elasticidade, não se pode esquecer de que todas as propriedades físicas estão inter-relacionadas. Assim, quando o tamanho das partículas é aumentado, a absorção de água também aumenta, enquanto a densidade diminui (SAVASTANO JR, 2000). Para Bejó, Takatis e Vass (2005), isso se justifica devido a uma maior densificação da madeira; quando os vazios são preenchidos, existe maior ligação entre a matriz cimentícia e as fibras de madeira.

Como é de se esperar, a resistência à compressão axial está correlacionada com a densidade e diminui em correspondência ao conteúdo total de madeira (AL RIM et al., 1999). Frybort et al. (2008) citam que os compósitos que possuem uma relação madeira:cimento com maior porcentagem de madeira do que cimento apresentam baixa densidade e são bons isolantes térmicos, mas apresentam valores elevados para inchamento. Para Del Menezzi, Castro e Souza (2007), isso ocorre para a maioria dos produtos florestais em que a densidade é um importante fator, visto estar relacionada à maioria das propriedades mecânicas.

Cabe observar que para escolher o tipo de partícula e a relação madeira:cimento para produção de um compósito, deve-se definir qual será a função final do compósito madeira-cimento. Para a produção de placas com baixa densidade e com boas propriedades físicas, por exemplo, alguns autores utilizam métodos como mudança de orientação, tipo e geometria das partículas. Nessa linha, Ma et al. (2002) e Miyatake et al. (2000) utilizaram partículas do tipo Strand, obtendo placas de média e alta densidade, respectivamente; enquanto Badejo (1988) utilizou partículas tipo Excelsior, produzindo placas de média densidade (entre 1.050 e 1.200 kg/m³).

Os resultados de Cabangon, Cunningham e Evans (2002) mostraram que se pode obter alto valor de flexão mesmo em compósitos com baixa densidade, orientando as partículas dentro das placas. Por sua vez, Semple e Evans (2004) estudaram os efeitos das geometrias das partículas, obtendo resultados melhores em partículas maiores (50 a 100 mm de comprimento). Diferentemente, Nazerian,

Ghalehno e Gozali (2011) utilizaram partículas médias (que passavam em peneiras de 5 mm) e obtiveram compósitos com módulo de ruptura de flexão estática maior do que de compósitos com partículas pequenas (que passavam em peneiras de 2 mm), justificado pelo intertravamento ocorrido nas partículas médias. No entanto, aplicando granulometrias passantes em peneiras de 7 mm, o módulo de ruptura ficou mais baixo do que os compósitos utilizando partículas médias.

A vibro-compactação pode trazer muitas vantagens, como apresentar compactação e aglutinação entre as partículas dos compósitos, sem a necessidade de prensagem e grampeamento (PARCHEN, 2012). Segundo Sousa (2001), a vibração ajuda no preenchimento e adensamento dos corpos de prova em concreto, acontecendo o mesmo com a madeira-cimento. Além disso, os mecanismos de vibração são responsáveis pelas características dos componentes moldados, sendo os principais parâmetros para uma boa vibração: frequência, amplitude, velocidade, aceleração e tempo de adensamento.

Nesse contexto, para reproduzir a moldagem efetuada em uma vibroprensa produtora de blocos, Lima (2009) confeccionou seus corpos de prova de madeira-cimento em moldes cilíndricos fixados a uma mesa vibratória, sendo o sistema nivelado, para garantir uma compactação homogênea do compósito. Na fabricação de painéis com baixa densidade utilizando resíduos de construção, Wolfe e Gjinolli (1997) observaram que a compactação feita por meio de vibrações de baixa frequência serviu para distribuir uniformemente as partículas dentro dos painéis.

Por fim, nos estudos de Stahl et al. (2002), com o objetivo de simular o processo industrial de produção de blocos, quatro formas cilíndricas foram fixadas a um vibrador; apesar dos esforços para manter um processo homogêneo, os resultados entre os compósitos foram muito variáveis, tendo sido o fato atribuído à vibração mais forte nos cilindros fixados mais próximos do vibrador.

5.2.1 Objetivo

Analisar a influência da dimensão das partículas de madeira e da velocidade de vibração da mesa aplicados nas propriedades físicas e mecânicas de corpos de prova de compósitos de madeira-cimento, por meio de ensaios mecânicos realizados em corpos de prova.

5.3 MATERIAIS E MÉTODOS

Foram utilizados cavacos de *Pinus* spp, procedentes de uma madeireira localizada no município de Tunas do Paraná, obtidos por meio de ações mecânicas de descascadores e picadores, comercializados como biomassa.

5.3.1 Preparação das partículas

Uma vez disponibilizado pela madeireira os cavacos foram levados ao Laboratório de Painéis da UFPR. Os cavacos com casca possuíam teor de umidade em torno de 52,25%, devido a necessidade da utilização dos cavacos secos para moagem procedeu-se sua secagem ao ar livre por um período de 48 horas; e posteriormente em estufa, reduzindo o teor de umidade médio para aproximadamente 3%.

Depois de secos, os materiais foram reduzidos em moinho de martelos no laboratório de painéis. Após a moagem, as partículas foram classificadas em peneiras do LAME sendo selecionadas aquelas que ficaram retidas nas peneiras de 2,36 mm; 4,75 mm e 6,3 mm.

Para os estudos propostos neste capítulo, além dos materiais retidos nas peneiras, utilizou-se parte do material antes de ser peneirado (T1 e T2). A nomenclatura dos materiais pode ser verificada no QUADRO 02 (página 76), apresentado anteriormente no capítulo 3.

5.3.2 Geometria das partículas

As partículas T1 e T2 foram classificadas por meio da curva granulométrica, conforme a norma NBR 7211 (ABNT, 2009b). Para determinação da geometria das partículas retidas nas peneiras #2,36, #4,75 e #6,3, foram medidos o comprimento, a largura e a espessura de 100 partículas retidas de cada peneira, com o auxílio de um paquímetro digital. Com o resultado dessas medições, foram calculados o IE (relação entre comprimento e espessura das partículas) e a RP (relação entre largura e espessura). A área superficial das partículas foi calculada pela equação sugerida por Moslemi (1974), conforme segue:

$$a' = \frac{2 \times ((e \times c) + (l \times c) + (e \times l))}{c \times l \times e \times d} \text{ (cm}^2\text{/g)} \quad \text{(EQUAÇÃO 06)}$$

Em que:

- a': área superficial (cm²/g);
- e: espessura da partícula (cm);
- l: largura da partícula (cm);
- c: comprimento da partícula (cm);
- d: densidade da madeira (g/cm³), considerando o valor de 0,44 g/cm³.

5.3.3 Aglomerantes

Para a produção dos corpos de prova dos compósitos de madeira-cimento utilizou-se o aglomerante hidráulico cimento Portland tipo CP II-Z, disponível no mercado de materiais para a construção civil. Também foi utilizada, como aglomerante, a cal aérea ou CaO (óxido de cálcio), conhecida no mercado consumidor como cal virgem. O óxido de cálcio foi hidratado, resultando dessa reação uma suspensão de Ca(OH)₂.

5.3.4 Equipamentos

Para a confecção dos corpos de prova foram utilizadas duas mesas vibratórias na pesquisa, tendo sido a primeira desenvolvida por Parchen (2012), no Laboratório de Painéis da UFPR, a partir de um motovibrador elétrico trifásico, com energia de vibração de 220 N a 3.000 RPM, acoplado a uma prancha de compensado flexível.

A segunda mesa vibratória (FIGURA 27) foi desenvolvida pela autora, também utilizando um vibrador elétrico trifásico, mas com o diferencial de possuir energia de vibração de 440 N a 3.600 RPM, acoplado a uma prancha de MDF. Ambas as mesas foram apoiadas sobre espumas no momento do funcionamento.

FIGURA 27 – MESA VIBRATÓRIA DESENVOLVIDA PELA AUTORA

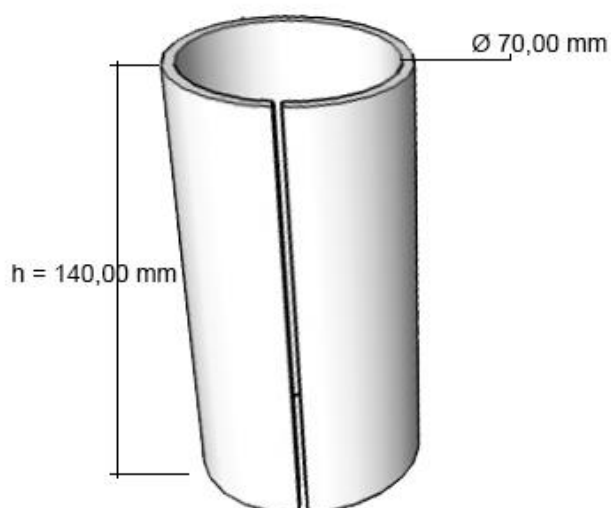


FONTE: A autora (2016).

5.3.5 Moldes para os corpos de prova

Para confecção dos corpos de prova utilizados para ensaio de resistência à compressão axial foram construídos moldes cilíndricos em tubos de PVC. Os moldes apresentavam dimensões de 70 mm de diâmetro e 140 mm de altura, possuindo um volume interno líquido de 538,8 cm³ (FIGURA 28).

FIGURA 28 – ILUSTRAÇÃO ESQUEMÁTICA DOS MOLDES CILÍNDRICOS



FONTE: A autora (2016).

5.3.6 Manufatura dos corpos de prova

Para a produção dos corpos de prova, se fez necessária a utilização dos resultados apresentados no capítulo anterior (página 96). Selecionando-se a relação água:cal para o pré-tratamento das partículas igual a 6,25:1.

Por sua vez, foi mantido o traço para produção dos corpos de prova dos compósitos de madeira-cimento, sendo 130 g de cimento e 100 g de resíduo de madeira, relação madeira:cimento de 1:1,5.

A adição de água utilizada foi de 30% do peso seco do cimento, isto é, 39 g de água. As dimensões das partículas utilizadas são citadas no QUADRO 02.

O plano experimental consistiu em dez tratamentos, com 14 corpos de prova cada, totalizando 140 corpos de prova, dos quais 70 sofreram vibração de 220 N e a outra metade, de 440 N, conforme o delineamento experimental apresentado no QUADRO 06 a seguir:

QUADRO 06 – DELINEAMENTO EXPERIMENTAL

| Tratamento | Nomenclatura | Dimensão das Partículas | Vibração |
|------------|--------------|--------------------------------------|----------|
| 121 | #2,36 | Passante na #4,75 e retidas na #2,36 | 220 N |
| 122 | #4,75 | Passante na #6,3 e retidas na #4,75 | |
| 123 | #6,3 | Passante na #9,5 e retidas na #6,3 | |
| 124 | T1 | Partículas moídas 1x | |
| 125 | T2 | Partículas moídas 2x | |
| 221 | #2,36 | Passante na #4,75 e retidas na #2,36 | 440 N |
| 222 | #4,75 | Passante na #6,3 e retidas na #4,75 | |
| 223 | #6,3 | Passante na #9,5 e retidas na #6,3 | |
| 224 | T1 | Partículas moídas 1x | |
| 225 | T2 | Partículas moídas 2x | |

FONTE: A autora (2016).

Para a confecção dos corpos de prova, inicialmente foi preparada uma suspensão de Ca(OH)_2 , na proporção de 6,25 de água para 1,00 em massa de CaO. A descrição dos materiais para produção dos corpos de prova está apresentada no QUADRO 07.

QUADRO 07 – MATERIAIS UTILIZADOS PARA PRODUÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

| Material | Quantidade |
|--------------------------------|-------------------|
| Cimento | 1.612 g |
| Resíduo de <i>Pinus</i> | 1.240 g |
| Suspensão de Ca(OH)_2 | 1.240 g |
| Água | 483,6 g |

FONTE: A autora (2016).

As partículas foram inicialmente colocadas em uma bandeja utilizada na construção civil e misturadas manualmente, com o mesmo peso de suspensão de Ca(OH)_2 . Depois de 15 minutos, foram adicionados cimento e água, conforme quantidade constante no QUADRO 07. Com todos os materiais misturados manualmente até a completa homogeneização, foram moldados os corpos de prova com o auxílio das mesas vibratórias. Os dez primeiros tratamentos foram realizados em mesa com energia dinâmica de 220 N, ocorrendo o adensamento por compactação vibrodinâmica; os tratamentos restantes foram realizados em mesa com energia dinâmica de 440 N.

Os moldes foram preenchidos em três fases, sendo a mesa ligada por 30 segundos em cada etapa, para adensamento do material. Após o total preenchimento dos moldes, eles foram cobertos por uma tampa circular produzida de MDF com 70 mm de diâmetro e 3 mm de espessura, mantendo-os perpendiculares a geratriz do cilindro. A mistura permaneceu dentro do molde por 48 horas; após este período, o molde foi aberto e os corpos de prova conservados ao ar livre até completar o tempo total de cura de 28 dias.

5.3.7 Determinação das propriedades físicas e mecânicas

Após a cura por 28 dias, os corpos de prova foram pesados, medidos e submetidos ao ensaio de compressão axial em máquinas de ensaios, conforme a NBR 5739 (ABNT, 2007).

5.3.8 Análise estatística

Para este estudo, foi realizado um delineamento experimental inteiramente casualizado, com arranjo fatorial para os tratamentos, visando avaliar a interação entre dois fatores: a vibração das mesas e a dimensão das partículas. Para verificar o efeito dos tratamentos sobre as propriedades dos corpos de prova, foi realizada uma análise de variância considerando a densidade uma covariável.

Os tratamentos foram avaliados quanto à sua homogeneidade pelo teste de Bartlett. O procedimento para comparação de médias foi o Tukey-Kramer e, para auxílio nos cálculos, foram utilizados os *softwares* Statgraphics Centurion XV e Statística 10.

5.4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.4.1 Dimensão das Partículas de Madeira

Na FIGURA 29 estão apresentadas imagens dos dois tipos de partículas geradas após os cavacos terem passado pelo moinho de martelos, sendo que T1 demonstra o material moído uma vez e T2 duas vezes. E os três tipos de partículas geradas após o peneiramento – material retido na peneira (2,36 mm, 4,75 mm e 6,3 mm). Em seguida, na TABELA 09, são apresentados os valores médios relativos aos dados sobre a geometria das partículas e suas respectivas áreas superficiais.

Na TABELA 09 são apresentados os valores médios relativos aos dados sobre a geometria das partículas de cada peneira e suas respectivas áreas superficiais.

TABELA 09 – VALORES MÉDIOS DO ÍNDICE DE ESBELTEZ, RAZÃO DE PLANICIDADE E DA ÁREA SUPERFICIAL DAS DIFERENTES DIMENSÕES DE PARTÍCULAS

| Partícula | Comprimento (mm) | Largura (mm) | Espessura (mm) | IE | RP | a' (cm ² /g) |
|-----------|------------------|--------------|----------------|-------------------|-------------------|-------------------------|
| #2,36 | 27,07 | 3,47 | 1,98 | 9,36 ^a | 1,84 ^a | 41,47 ^a |
| #4,75 | 21,17 | 7,22 | 4,47 | 3,06 ^b | 1,75 ^a | 20,24 ^b |
| #6,3 | 30,15 | 7,94 | 4,95 | 4,01 ^b | 1,75 ^a | 17,69 ^b |

FONTE: A autora (2016).

NOTA: sendo IE, o índice de esbeltez; RP a razão de planicidade; a' = área superficial das partículas. Valores dentro de uma mesma coluna acompanhado de letras diferentes indicam diferença estatística apontada pelo teste Tukey a um nível de probabilidade de 95%.

FIGURA 29 – COMPARAÇÃO DO TAMANHO DAS PARTÍCULAS ANTES E APÓS PENEIRAMENTO



FONTE: A autora (2016).

LEGENDA : T1 – Material moído uma vez;
 T2 – Material moído duas vezes;
 #2,36 – Material retido na peneira 2,36mm;
 #4,75 – Material retido na peneira 4,75 mm;
 #6,30 – Material retido na peneira 6,3 mm

Conforme observado na TABELA 09 as partículas retidas em #2,36 mm apresentam a relação entre comprimento e largura (IE) estatisticamente superior as partículas retidas em #4,75 mm e #6,3 mm. E entre os valores médios da razão de planicidade (RP), não houve diferença estatística, o que indica que os três tipos de partículas apresentam espessuras proporcionalmente semelhantes.

Partículas menores tenderam a ser mais esbeltas, enquanto que as outras partículas apresentaram um menor valor de índice de esbeltez, indicando partículas mais curtas. Os valores médios sobre a área superficial seguiram o mesmo comportamento, onde as partículas menores apresentaram maior área de contato.

O índice de esbeltez (IE) é um parâmetro das partículas que pode influenciar sobre a área de contato das mesmas e, como consequência, influenciar nas propriedades mecânicas dos compósitos. O que poderá ser verificado nos resultados apresentados a seguir.

5.4.2 Propriedades físicas e mecânicas

Os resultados obtidos nos experimentos realizados nesta etapa estão apresentados na TABELA 10. Nela estão elencados os valores médios obtidos na avaliação das propriedades físicas e mecânicas (densidade aparente e resistência à compressão axial) considerando-se as duas velocidades de vibração.

TABELA 10 – RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL E DENSIDADE APARENTE DOS CORPOS DE PROVA DOS COMPÓSITOS DE MADEIRA-CIMENTO PRODUZIDOS COM DUAS VIBRAÇÕES E DOIS PRÉ-TRATAMENTOS DE PARTÍCULAS

| Tratamento | Dimensão Partículas | Vibração (N) | Água:cal (Massa) | Densidade aparente (g/cm ³) | Resistência à Compressão Axial (MPa) |
|------------|---------------------|--------------|------------------|-----------------------------------------|--------------------------------------|
| 121 | #2,36 | 220 N | 6,25:1 | 0,63 (6,0%) | 1,62 (13,0%) |
| 122 | #4,75 | | | 0,64 (6,0%) | 1,36 (11,0%) |
| 123 | #6,3 | | | 0,59 (5,0%) | 1,11 (10,0%) |
| 124 | T1 | | | 0,61 (4,0%) | 1,01 (21,0%) |
| 125 | T2 | | | 0,63 (2,0%) | 1,36 (13,0%) |
| 221 | #2,36 | 440 N | 6,25:1 | 0,61 (3,0%) | 1,27 (10,0%) |
| 222 | #4,75 | | | 0,58 (1,0%) | 0,9 (10,0%) |
| 223 | #6,3 | | | 0,58 (2,0%) | 0,83 (13,0%) |
| 224 | T1 | | | 0,62 (3,0%) | 0,84 (22,0%) |
| 225 | T2 | | | 0,61 (2,0%) | 0,78 (14,0%) |

FONTE: A autora (2016).

NOTA: Valores entre parênteses indicam o coeficiente de variação.

Para ajuste, a densidade aparente dos corpos de prova foi tratada como uma covariável durante a análise estatística, tendo sido os resultados padronizados para a densidade aparente fixa de 0,6192.

Na TABELA 11, estão apresentados os resultados da análise de variância fatorial para a propriedade de resistência à compressão axial e os valores de Qui-quadrado referentes ao teste de Bartlett. A variável analisada apresentou variância homogênea, não requerendo transformação dos dados.

TABELA 11 – ANÁLISE DE VARIÂNCIA PARA VELOCIDADE VIBRAÇÃO E DIMENSÕES DAS PARTÍCULAS

| Fonte de variação | SQ | Grau de liberdade | Quadrado médio | F | P |
|-------------------------|--------|-------------------|---------------------|--------|----------|
| Covariável – densidade | 1,9714 | 1 | 1,9714 | 168,23 | 0,0000** |
| A: vibração | 1,1952 | 1 | 1,1952 | 101,99 | 0,0000** |
| B: dimensão-Part. | 3,1238 | 4 | 0,7809 | 66,64 | 0,0000** |
| Interação AB | 0,6112 | 4 | 0,1528 | 13,04 | 0,0000** |
| Coeficiente de variação | | | 14,77 | | |
| Qui-quadrado | | | 26,58 ^{ns} | | |

FONTE: A autora (2016).

NOTAS: ns = não significativo. ** = significativo a 1% de probabilidade. * = significativo a 5% de probabilidade.

Ao analisar os resultados da TABELA 11, verifica-se que a utilização de densidade como covariável foi estatisticamente significativa ($p < 0,01$). A interação entre os dois fatores (vibração e dimensão das partículas) também foi estatisticamente significativa ($p < 0,01$), indicando que seus efeitos não são independentes. Os fatores principais vibração e dimensão das partículas também apresentaram diferenças estatisticamente significativas ($p < 0,01$), indicando que existe diferença entre as unidades experimentais.

As médias das resistências à compressão axial corrigidas pela covariável densidade são apresentadas na TABELA 12. Uma vez que o objetivo deste capítulo é estudar a interação entre as dimensões das partículas e as velocidades de vibração das mesas, observa-se na TABELA 12 para cada dimensão da partícula estudada qual velocidade de vibração apresenta valores mais elevados de resistência à compressão axial.

TABELA 12 – VALORES MÉDIOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL CORRIGIDOS PELA COVARIÁVEL DENSIDADE, PARA DIFERENTES DIMENSÃO DAS PARTÍCULAS E DUAS VIBRAÇÕES

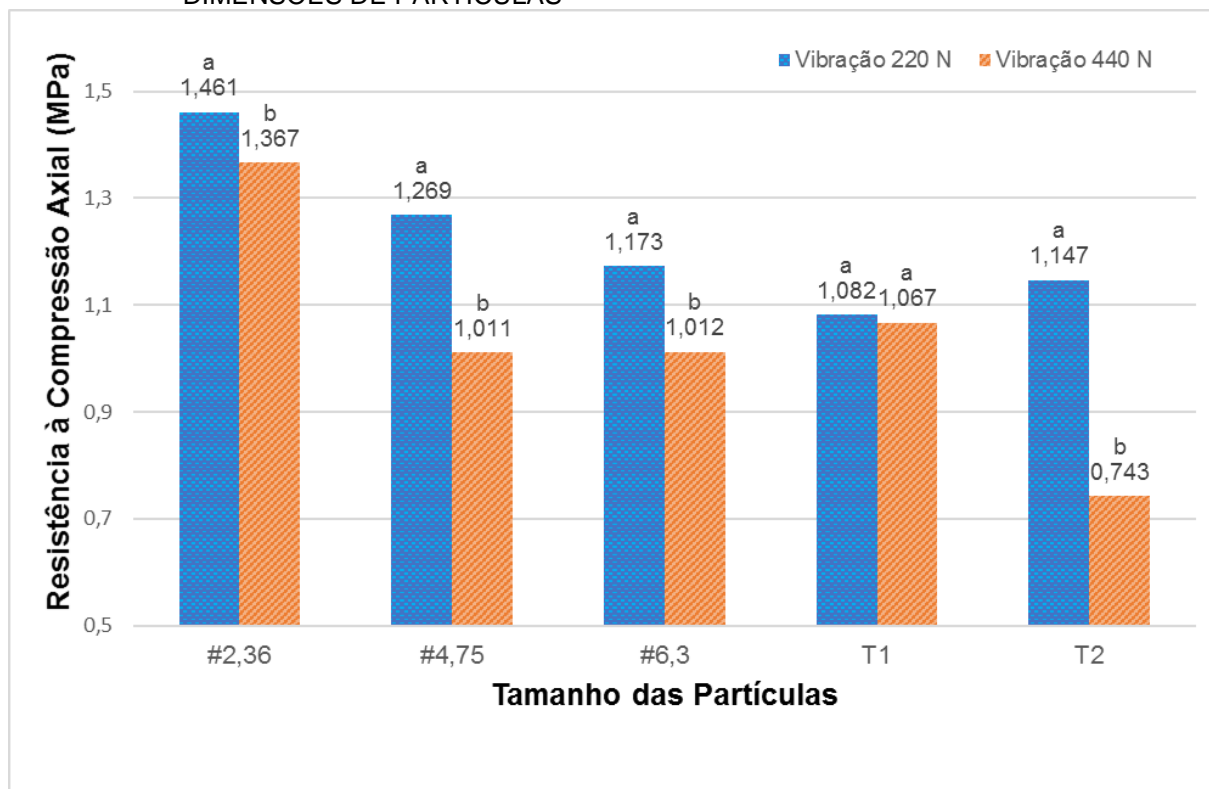
| Vibração | Resistência à compressão Axial (MPa) | | | | |
|----------|--------------------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| | #2,36 | #4,75 | #6,3 | T1 | T2 |
| 220 N | 1,461 ^a | 1,269 ^a | 1,173 ^a | 1,082 ^a | 1,147 ^a |
| 440 N | 1,367 ^b | 1,011 ^b | 1,012 ^b | 1,067 ^a | 0,743 ^b |

FONTE: A autora (2016).

NOTA: Médias seguidas pela mesma letra na mesma coluna não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

A FIGURA 30 apresenta as médias das resistências à compressão axial dos corpos de prova produzidos com vibração de 220 N, comparadas às médias das resistências à compressão axial dos corpos de prova produzidos com vibração de 440N, utilizando diferentes dimensões de partículas.

FIGURA 30 – VALORES MÉDIOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL PARA CORPOS DE PROVA PRODUZIDOS COM VIBRAÇÃO DE 220 N E 440 N, PARA DIFERENTES DIMENSÕES DE PARTÍCULAS



FONTE: A autora (2016).

NOTA: Letras diferentes acima de colunas indicam diferença estatística a um nível de 95%

Os corpos de prova dos compósitos de madeira-cimento produzidos com vibração de 220 N apresentaram valor médio de resistência à compressão axial estatisticamente superior aos produzidos com vibração de 440 N em quatro das cinco dimensões de partículas estudadas (#2,36, #4,75, #6,3 e T2). Somente nas partículas de T1 (moídas uma vez) os corpos de prova dos compósitos de madeira-cimento produzidos não apresentaram diferença estatística entre as vibrações. Neste estudo, nos corpos de prova produzidos com vibração de 440 N, algumas partículas saltaram para fora dos moldes cilíndricos, e o material mais fino se acomodou ao fundo dos moldes, ocorrendo praticamente uma segregação dos materiais.

Nos estudos de Stahl et al. (2002), os corpos de prova mais próximos dos vibradores apresentaram melhores resultados, segundo os autores isso ocorreu pela amplitude em relação à posição dos vibradores. É citado por Zanetti (2010), que o excesso de vibração pode ocasionar uma segregação do agregado.

As médias das resistências à compressão axial obtidas para as vibrações 220 N e 440 N para as diferentes dimensões de partículas são apresentadas na TABELA 13.

TABELA 13 – RESULTADO DOS VALORES DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL PARA AS VIBRAÇÕES 220 N E 440 N PARA DIFERENTES DIMENSÕES DE PARTÍCULAS

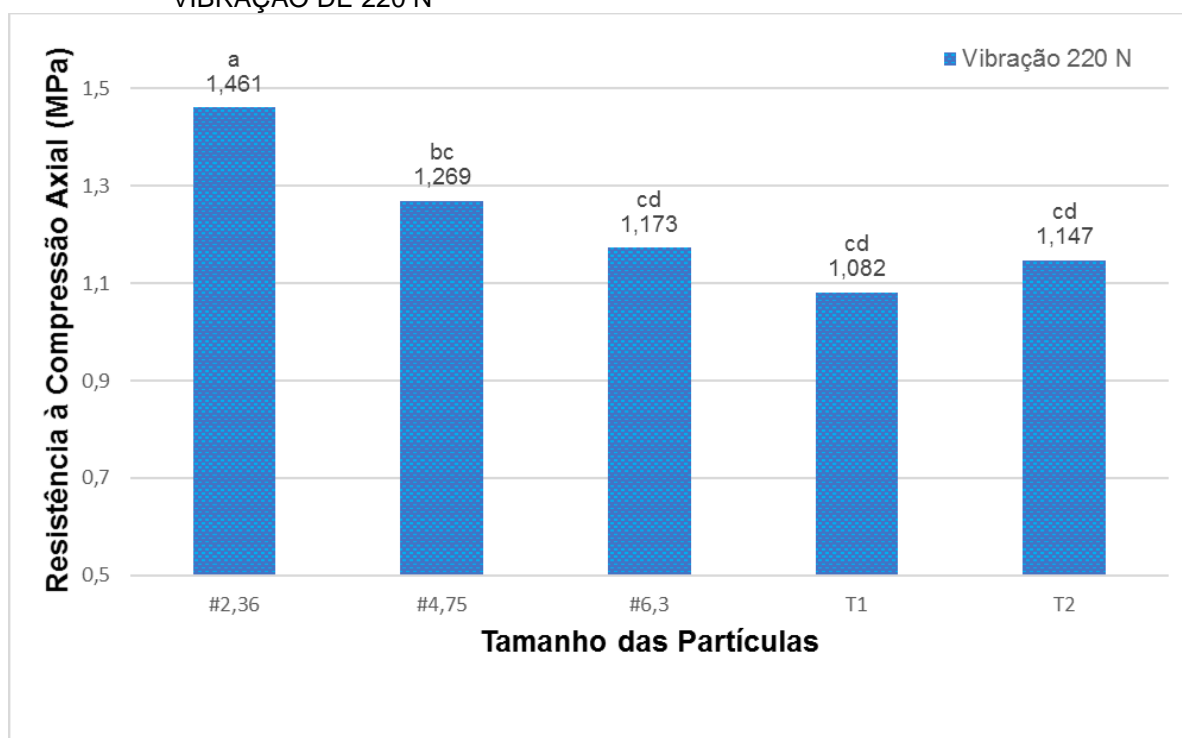
| Dimensão das Partículas | Resistência à compressão Axial (MPa) | |
|-------------------------|--------------------------------------|--------------------|
| | Vibração 220 N | Vibração 440 N |
| #2,36 | 1,461 ^a | 1,367 ^a |
| #4,75 | 1,269 ^{bc} | 1,011 ^b |
| #6,3 | 1,173 ^{cd} | 1,012 ^b |
| T1 | 1,082 ^{cd} | 1,067 ^b |
| T2 | 1,147 ^{cd} | 0,743 ^c |

FONTE: A autora (2016).

NOTA: Médias seguidas pela mesma letra na mesma coluna não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

A FIGURA 31 indica os valores médios encontrados para a propriedade de resistência à compressão axial somente para os corpos de prova produzidos com a vibração 220 N. Letras diferentes entre as colunas significam que houve diferença estatística entre os resultados de acordo com o teste de Tukey.

FIGURA 31 – VALORES MÉDIOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL PARA CORPOS DE PROVA COM DIFERENTES DIMENSÕES DE PARTÍCULAS PRODUZIDOS COM VIBRAÇÃO DE 220 N

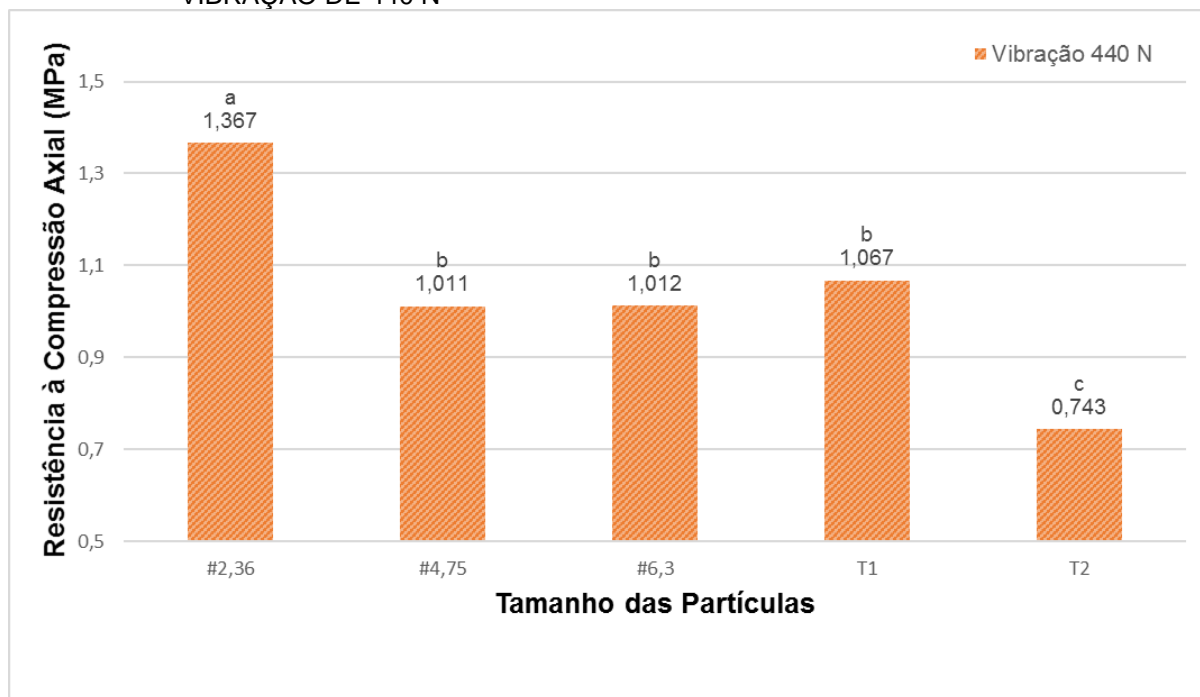


FONTE: A autora (2016).

NOTA: Letras diferentes acima de colunas indicam diferença estatística a um nível de 95%

A FIGURA 32 indica os valores médios encontrados para a propriedade de resistência à compressão axial para os corpos de prova produzidos com a vibração 440 N.

FIGURA 32 – VALORES MÉDIOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL PARA CORPOS DE PROVA COM DIFERENTES DIMENSÕES DE PARTÍCULAS PRODUZIDOS COM VIBRAÇÃO DE 440 N



FONTE: A autora (2016).

NOTA: Letras diferentes acima de colunas indicam diferença estatística a um nível de 95%

Os corpos de prova dos compósitos de madeira-cimento produzidos com partículas retidas na peneira #2,36 apresentaram valor médio de resistência à compressão axial de 1,46 MPa para vibração de 220 N e 1,367 MPa para vibração de 440 N os quais são estatisticamente superiores aos corpos de prova dos compósitos de madeira-cimento produzidos com partículas maiores e aos corpos de prova dos compósitos de madeira-cimento utilizando todo material sem peneiramento (T1 e T2).

Estes resultados estão coerentes com outros estudos, como de Nazerian, Ghalehno e Gozali (2011), em que as partículas médias (passantes em peneiras de 5 mm) tiveram melhor resultado, devido à menor quantidade de vazios e, conseqüentemente, à melhor ligação entre as partículas. Já Olorunnisola (2009) afirmou que partículas menores aumentam a área da superfície de aderência, resultando em propriedades de resistência melhores. Castro (2015) concluiu em seus

estudos que compósitos produzidos com partículas pequenas (retida em malha 1,40mm) permitem uma melhor vibração e acomodação do material.

5.5 CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos neste capítulo, as seguintes conclusões podem ser apresentadas:

- As partículas passantes na peneira com malha 4,75 mm e retidas na peneira com malha 2,36 mm apresentaram maiores resultados de resistência à compressão axial, independente da velocidade de vibração utilizada;
- Os corpos de prova dos compósitos de madeira-cimento produzidos com mesa vibratória de 220 N e 3.000 RPM resultaram em uma mistura mais homogênea, uma vez que no processo de vibração, o excesso de vibração causou segregação dos materiais.
- Na iteração entre a vibração e o tamanho das partículas o compósito com vibração 220N e menor tamanho de partícula apresenta o maior resultado de resistência à compressão axial.

6 AVALIAÇÃO DOS EFEITOS DA INCORPORAÇÃO DE ADITIVO E ADIÇÃO MINERAL NA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL DE COMPÓSITOS DE MADEIRA-CIMENTO PRODUZIDOS PELO MÉTODO DE VIBRO-COMPACTAÇÃO

6.1 RESUMO

A busca por valores mais elevados de resistência à compressão axial conduziu à necessidade de uso de adição mineral e aditivo superplastificante na produção dos compósitos de madeira-cimento. O presente capítulo teve como objetivo avaliar a influência de adição mineral e aditivo superplastificante adicionados aos compósitos de madeira-cimento. Os materiais empregados foram partículas de *Pinus* spp retidas em peneira de malha 2,36 mm, Ca(OH)_2 como agente de pré-tratamento das partículas, cimento Portland como aglomerante, adições e aditivos (sílica da casca de arroz e superplastificante). A metodologia utilizada aplicou pré-tratamento das partículas com suspensão de Ca(OH)_2 , sendo avaliadas a adição de sílica da casca de arroz nas proporções de 3% e 5% e a adição de superplastificante nas proporções de 3% e 5%. Os valores das médias da resistência à compressão axial foram comparados entre si e a um tratamento testemunho (sem adição de aditivos). Os tratamentos apresentaram diferenças nos resultados das médias de resistência à compressão axial realizada aos 28 dias de idade. Os resultados demonstraram a inviabilidade da utilização de adições ou aditivos, pois o tratamento testemunho apresentou maiores resultados estatísticos quando comparado aos tratamentos com adições e/ou aditivos.

6.2 INTRODUÇÃO

A utilização de aditivos em concretos e compósitos de cimento é consolidada na sua tecnologia de produção. Sua aplicação destina-se a modificar as suas propriedades no estado fresco e endurecido, melhorando o seu desempenho mecânico e suas qualidades às solicitações físicas e químicas, tornando os compósitos de cimento Portland mais econômicos e duráveis. Deve-se observar, no entanto, que existe um limite entre as vantagens de desempenho e o custo final do compósito. Assim, quanto maior o teor de aditivos, mais caro pode ficar o produto final.

Para este estudo, foi utilizada a sílica da casca de arroz, considerada uma adição mineral e um superplastificante.

Conforme Moslemi (1989), o cimento Portland é o componente mais caro de um compósito de madeira-cimento, devido à quantidade necessária para manter os desempenhos finais desejados. Segundo Carmo (2006), além da redução do consumo de cimento Portland com a utilização de materiais cimentícios alternativos, podem-se obter ganhos nas resistências mecânicas finais.

Vários tipos de materiais cimentícios alternativos, como sílica ativa, sílica da casca de arroz, metacaulim e outros, têm sido amplamente estudados e utilizados na indústria da construção, como citado por Chatveera e Lertwattanakul (2009), Coutinho (2003) e Torkaman, Ashori e Momtazi (2014). Este último, ao investigarem os efeitos da substituição parcial do cimento Portland por materiais alternativos, indicaram que a resistência à compressão axial das amostras melhorou à medida que aumentou o teor de cinza de casca de arroz até 25%. Isso se deve ao fato de ter aumentado o grau de compatibilidade das fibras com o cimento. Lima e Iwakiri (2011) demonstraram que a utilização da cinza de casca de arroz tem vários efeitos benéficos na produção de compósitos em concreto, tanto no estado fresco quanto no endurecido. Segundo Pedrozo (2008) no estado fresco, pode proporcionar maior estabilidade e trabalhabilidade e, no caso do concreto endurecido, aumentar a resistência à compressão axial.

Ressalta-se que o Brasil está entre os dez principais produtores mundiais de arroz (FAO, 2014), sendo esperada, para a safra de 2016, uma produção de 10,7 milhões de toneladas de arroz em casca (IBGE, 2016). Nas primeiras operações no beneficiamento do grão de arroz, obtém-se a casca, numa razão de 200 g/kg de arroz em casca, aproximadamente, resultando em 2,4 milhões de toneladas de casca. Nos estudos de FOLETTO et al. (2005) foi mencionado que por alguns anos as cascas eram descartadas no meio ambiente, em terrenos baldios ou fundo de rios. Entretanto, nos últimos anos, têm crescido as pesquisas para transformação de suas cinzas em subprodutos de interesse comercial. Com a sua queima, obtém-se aproximadamente 20% de sílica, totalizando 480 mil toneladas por ano no Brasil, o suficiente para suprir o mercado de concretos estruturais e outros (LIMA; IWAKIRI, 2011). Conforme citado nas pesquisas de CHINDAPRASIRT; RUKZON; SIRIVIVATNANON, (2008) quando queimada adequadamente, a casca de arroz pode ser moída, transformando-se em

um material pozolânico, e utilizada na produção de compósitos cimentícios, podendo substituir até 30% do cimento, sem afetar a resistência e permeabilidade do concreto (GANESAN; RAJAGOPAL; THANGAVEL, 2008).

Segundo Silva et al. (2006), alguns aditivos minerais podem também ser empregados em painéis de madeira-cimento para melhorar suas propriedades, aumentando, principalmente, a resistência à umidade. John e Agopyan (1993) indicaram que esses aditivos contribuem para o aumento da durabilidade de compósitos com fibra e partículas vegetais. Isso ocorre devido ao consumo de parte do Ca(OH)_2 concentrado na zona de transição, possibilitando melhor aderência entre as fibras e a matriz.

Lange, Simatupang e Neunauer (1989) consideram que, entre os aditivos minerais, a sílica ativa ou microsílica é a mais promissora para uso em painéis minerais. De acordo com os autores, a substituição parcial do cimento Portland por porções de sílica tem um efeito surpreendente sobre as propriedades de resistência dos painéis feitos com espécies vegetais de baixa compatibilidade utilizando o cimento como aglomerante. Neste estudo, o cimento também foi substituído por cinza de casca de arroz (CCA), o que promoveu um aumento da qualidade dos painéis, entretanto o melhor resultado obtido foi com utilização da sílica ativa.

Por sua vez, os resultados da pesquisa de Lima e Iwakiri (2012) comprovaram a possibilidade de uso de cinza volante e escórias de alto-forno para substituição parcial do cimento Portland na produção de compósitos de madeira-cimento. Essa substituição contribuiu de forma significativa em termos de redução de impacto ambiental. Ainda, para a produção de blocos para alvenaria estrutural com substituição parcial do agregado miúdo por resíduo de *Pinus*, Lima e Iwakiri (2011) mostram que a substituição parcial do cimento por CCA, cinza volante e sílica ativa propiciou melhorias nas propriedades físicas e mecânicas dos blocos.

Nos estudos de Simatupang et al. (1989), a adição da sílica ativa e da CCA foi utilizada para melhorar a compatibilidade entre o cimento e a espécie madeira. A sílica é um material extremamente fino, sendo seu grão cerca de 100 vezes menor que o do cimento; devido a essa finura, ocorre o aumento da absorção de água, podendo-se diminuir a trabalhabilidade de uma pasta produzida com ela. Dessa forma, todo o benefício que se consegue na resistência e durabilidade do compósito pode ser

contraposto pela necessidade de mais água, a menos que um aditivo superplastificante seja empregado na mistura (KUNTZ, 2006).

Os aditivos superplastificantes, são substâncias orgânicas incorporadas ao concreto em pequenas quantidades, com o propósito de reduzir a relação água:aglomerante, mantendo uma consistência fixa, ou, alternadamente, melhorar a consistência, mantendo uma relação água:aglomerante constante (MEHTA; MONTEIRO, 2008; RIXON; MAILVAGANAM, 1999). Normalmente, sua quantidade é limitada a teores em torno de 1% a 4% da massa de aglomerante (AİTCIN, 2000).

A utilização de superplastificantes tem se desenvolvido enormemente nos últimos 20 anos e se mantém em contínuo processo de aperfeiçoamento (SPIRATOS; JOLICOEUR, 2000; TSENG et al., 2000; VERONEZ, 2006). Lima (2009) afirma que esta é uma prática comum na tecnologia do concreto, mas inovadora quando se trata de compósitos de madeira-cimento. Nesse sentido, nos estudos de Parchen (2012), a utilização de reforçador de aderência e superplastificante produziu melhores resultados no tocante à resistência à compressão axial nos compósitos de madeira-cimento. Nos estudos de Costa (2011), que utilizou cortiça como agregado na composição de concretos, concluiu-se que, em concretos com cortiça, esse aditivo não é benéfico. Por sua vez, Lima (2009) acreditava que a utilização do superplastificante servia somente para manter as características reológicas do compósito no estado fresco, sem a necessidade de adicionar mais água ao traço. Porém, após suas análises, constatou uma forte correlação entre a resistência à compressão axial aos 91 dias e o teor de aditivo superplastificantes nos compósitos. Entretanto, essa utilização ficou limitada a 4%, pois, acima desse valor, apareceram macroporos nos compósitos.

6.2.1 Objetivo

Esta etapa do trabalho teve como objetivo analisar a influência de aditivo mineral e superplastificante adicionados às partículas de madeira na confecção de corpos de prova de compósitos de madeira-cimento.

6.3 MATERIAIS E MÉTODOS

Foram utilizados cavacos de *Pinus* spp, procedentes de uma madeira localizada no município de Tunas do Paraná, obtidos por meio de ações mecânicas de descascadores e picadores, comercializados como biomassa.

6.3.1 Preparação das partículas

Os cavacos secos foram processados em um moinho de martelos utilizando-se uma peneira de 1" (2,54 cm) na saída da ação de moagem, limitando, assim, o tamanho máximo dos cavacos produzidos. Após a moagem, o material foi peneirado e somente o material passante na peneira de 4,75 mm e retido na de 2,36 mm foi utilizado nesta etapa da pesquisa. Conforme detalhamento metodológico apresentado no capítulo 3, nesta etapa foram obtidos o IE e o RP das partículas, cujos resultados estão apresentados na TABELA 14.

TABELA 14 – VALORES MÉDIOS DO ÍNDICE DE ESBELTEZ, RAZÃO DE PLANICIDADE E DA ÁREA SUPERFICIAL DA PARTÍCULA

| Tamanho. | Comprimento (mm) | Largura (mm) | Espessura (mm) | IE | RP | a' (cm ² /g) |
|----------|------------------|--------------|----------------|------|------|-------------------------|
| #2,36 | 27,07 | 3,45 | 2,00 | 8,52 | 1,92 | 42,01 |

FONTE: A autora (2016).

NOTA: sendo IE, o índice de esbeltez; RP a razão de planicidade; a' = área superficial da partícula.

6.3.2 Aglomerantes

Como aglomerante foi utilizado o cimento Portland do tipo CP II-Z, cuja composição e características químicas e físicas, informadas pelo fabricante, estão apresentadas na TABELA 15 e na TABELA 16.

TABELA 15 – COMPOSIÇÃO DO CIMENTO PORTLAND CP II-Z

| Sigla | Classe de resistência | Componentes (% em massa) | | | |
|---------|-----------------------|-------------------------------|---------------------------------|----------------------|----------------------|
| | | Clínquer + sulfatos de cálcio | Escória granulada de alto forno | Material pozzolânico | Material carbonático |
| CP II-Z | 25 | 94-76 | - | 6-14 | 0-10 |
| | 32 | | | | |
| | 40 | | | | |

FONTE: ABNT (1997A).

TABELA 16 – CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS DO CIMENTO PORTLAND CP II-Z

| Determinações químicas | Limites (% da massa) |
|------------------------|----------------------|
| Resíduo insolúvel | ≤ 16,0 |
| Perda ao fogo | ≤ 6,5 |
| Óxido de magnésio | ≤ 6,5 |
| Trióxido de enxofre | ≤ 4,0 |
| Anidrido carbônico | ≤ 5,0 |

FONTE: ABNT (1997A).

6.3.3 Adição Mineral e Aditivos

No tocante ao aditivo superplastificante, foram estudados corpos de prova com adição de superplastificante com origem de lignossulfonatos, que, ao serem misturados com a água de amassamento, diminuem a tensão superficial da pasta de cimento. O aditivo escolhido foi o Muraplast FK-22, que é um superplastificante de pega normal.

Em relação à sílica da casca de arroz, em alguns corpos de prova utilizou-se a sílica proveniente da queima controlada da casca de arroz em sistema de combustão via leito fluidizado, conhecida como Silcca Nobre. Suas propriedades físicas e químicas estão informadas na TABELA 17.

TABELA 17 – PROPRIEDADES FÍSICAS E QUÍMICAS DA SÍLICA DA CASCA DE ARROZ

| Característica | Resultado |
|---------------------------------------|-----------|
| Perda ao fogo (%) | < 3,5 |
| Umidade (%) | < 3 |
| Teor de sílica amorfa | > 95 |
| Densidade aparente | > 550 |
| Massa específica (g/cm ³) | 2,16 |

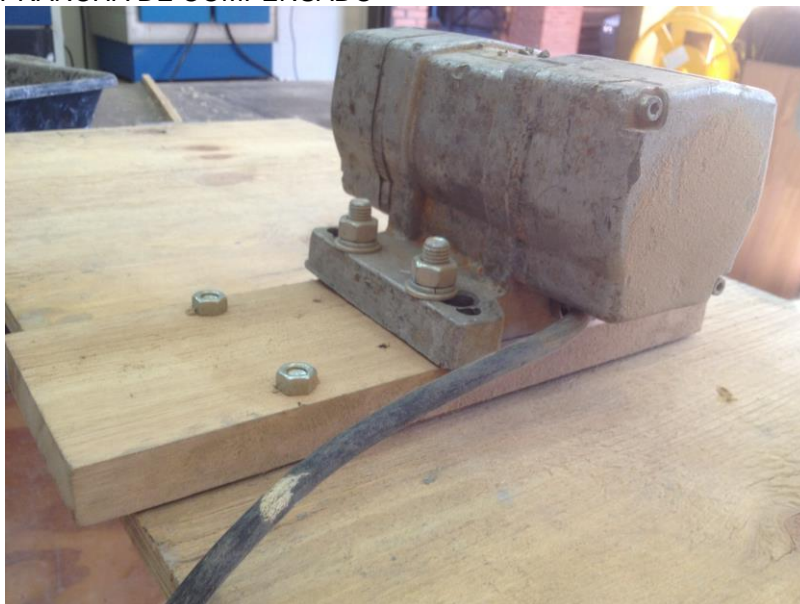
FONTE: PILECCO SÍLICA (2014).

6.3.4 Equipamentos

Para a confecção dos corpos de prova foi utilizada uma mesa vibratória, desenvolvida por Parchen (2012) no Laboratório de Painéis da UFPR, formada por um vibrador elétrico trifásico com ajuste mecânico dos excêntricos promotores da

energia de vibração, com carga de impacto vertical de 220 N a 3.000 RPM, acoplado a uma prancha de compensado flexível.

FIGURA 33 – MESA VIBRATÓRIA, COMPOSTA DE MOTOR ELÉTRICO ACOPLADO A UMA PRANCHA DE COMPENSADO



FONTE: A autora (2016)

6.3.5 Moldes para os corpos de prova

Para a confecção dos corpos de prova, para ensaio de resistência à compressão axial foram construídos moldes cilíndricos produzidos com tubos de PVC. Os moldes apresentavam dimensões de 70 mm de diâmetro e 140 mm de altura, possuindo um volume interno líquido de 538,8 cm³ e abertura ao longo da geratriz, fechados por cintas plásticas para facilitar o desmolde.

6.3.6 Manufatura dos corpos de prova

Com base nos resultados obtidos por meio dos ensaios apresentados nos capítulos 04 e 05 (págs. 96 e 112), foi selecionado o material passante pela peneira 4,75 mm e retido na peneira de 2,36 mm. A relação água:cal para produção de Ca(OH)₂ foi de 6,25:1 e a velocidade da mesa vibratória, de 220 N; o traço para produção dos corpos de prova teve relação madeira:cimento de 1:1,5 e adição de água igual a 30% do peso seco do cimento.

O plano experimental consistiu de seis tratamentos, com sete corpos de prova cada, totalizando 42 corpos de prova, conforme apresentado no QUADRO 08.

QUADRO 08 – DELINEAMENTO EXPERIMENTAL

| Tratamento | Teor de Aditivo (% em relação ao cimento) |
|------------|-------------------------------------------|
| 1 | Sílica 3% |
| 2 | Sílica 5% |
| 3 | Sílica 3% + superplastificante 3% |
| 4 | Sílica 5% + superplastificante 3% |
| 5 | Superplastificante 3% |
| 6 | Testemunha - Sem aditivos |

FONTE: A autora (2016).

Para confecção dos corpos de prova, foi preparada uma suspensão de Ca(OH)_2 na proporção de 6,25 de água para 1,00 em massa de CaO. A quantidade dos materiais para produção dos corpos de prova está apresentada no QUADRO 09 a seguir.

QUADRO 09 – QUANTIFICAÇÃO DE MATERIAIS UTILIZADOS PARA A CONFECÇÃO DE SETE CORPOS DE PROVA PARA OS TRATAMENTOS APRESENTADOS NO DELINEAMENTO EXPERIMENTAL

| | Tratamento | | | | | |
|------------------------------------|------------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Material | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| Cimento (g) | 1136,96 | 1136,96 | 1136,96 | 1136,96 | 1136,96 | 1136,96 |
| Partículas de pinus (g) | 871,67 | 871,67 | 871,67 | 871,67 | 871,67 | 871,67 |
| Suspensão de Ca(OH)_2 (g) | 871,67 | 871,67 | 871,67 | 871,67 | 871,67 | 871,67 |
| Água (g) | 341,09 | 341,09 | 341,09 | 341,09 | 341,09 | 341,09 |
| Sílica de casca de arroz (g) | 34,11 | 56,85 | 34,11 | 56,85 | - | - |
| Superplastificante (g) | - | - | 34,11 | 34,11 | 34,11 | - |

FONTE: A autora (2016).

Para confecção dos corpos de prova, as partículas foram inicialmente colocadas em uma bandeja utilizada na construção civil e misturadas manualmente, com o mesmo peso de suspensão de Ca(OH)_2 . Após 15 minutos foram adicionados cimento e água misturando-se todos os materiais até a obtenção de uma massa homogênea. Nos tratamentos com sílica (1, 2, 3 e 4), a mesma foi misturada anteriormente ao cimento, já nos tratamentos com superplastificante (3, 4 e 5), este foi misturado anteriormente a água de amassamento.

Após a mistura dos materiais, foram moldados corpos de prova com auxílio da mesa vibratória. Os moldes foram preenchidos em três fases, sendo a mesa ligada

por 30 segundos a cada etapa, para adensamento do material. Os moldes, após terem seu volume total preenchido, foram cobertos por uma tampa circular produzida em MDF com 70 mm de diâmetro, mantendo-os perpendiculares a geratriz do cilindro.

A mistura foi mantida dentro do molde por 48 horas. Após esse período, o molde foi aberto e os corpos de prova conservados em lugar seco e ventilado, abrigados da luz solar, até completar o tempo total de cura de 28 dias.

6.3.7 Determinação da resistência à compressão axial

Após a cura, os corpos de prova foram pesados, medidos e submetidos ao ensaio de compressão axial, conforme a NBR 5739 (ABNT, 2007).

6.3.8 Análise estatística

Os resultados obtidos nos ensaios realizados durante o estudo deste capítulo tiveram sua análise feita por meio do *software* Statgraphics Centurion XV, versão 15.2.11. O método adotado foi a análise da variância, sendo as variâncias dos tratamentos inicialmente avaliadas quanto à sua homogeneidade pelo teste de Bartlett; havendo diferenças significativas, aplicou-se o de médias de Tukey-Kramer, utilizando o mesmo *software*.

6.4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados das análises estatísticas obtidas para todos os valores encontrados, sem levar em consideração os tratamentos testados, são apresentadas na TABELA 18. A média encontrada foi de 1,10 MPa e o coeficiente de variação de 27,17% para uma amplitude de 0,69 a 1,95 MPa.

TABELA 18 – ESTATÍSTICAS DESCRITIVAS DA VARIÁVEL RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL

| Estatística | Resistência à Compressão Axial (MPa) |
|-----------------------------|---------------------------------------------|
| Mínimo | 0,6973 |
| Máximo | 1,9556 |
| Amplitude | 1,2583 |
| Média | 1,1043 |
| Variância | 0,090 |
| Desvio padrão | 0,300 |
| Erro padrão | 0,122 |
| Coeficiente de variação (%) | 27,17 |

FONTE: A autora (2016).

Na TABELA 19 são apresentados os resultados da análise de variância da resistência máxima à compressão axial, além dos valores de Qui-quadrado referentes ao teste de Bartlett. Pode-se observar que a variável analisada apresentou variâncias dos tratamentos homogênea, não requerendo transformação dos dados.

TABELA 19 – ANÁLISE DE VARIÂNCIA

| Fonte de variação | Grau de liberdade | Quadrado médio |
|--------------------------|--------------------------|-----------------------|
| Covariável – densidade | 1 | 0,5993** |
| Tratamentos | 5 | 0,400** |
| Erro | 35 | 0,003 |
| Coeficiente de variação | | 12,87% |
| Qui-quadrado | | 7,78 ^{ns} |

FONTE: A autora (2016).

NOTAS: ns = não significativo. ** = significativo a 1% de probabilidade.

Verificou-se ao analisar os resultados da TABELA 19 que, para a resistência à compressão axial, a utilização da densidade como covariável foi estatisticamente significativa ($p < 0,01$). O fator tratamento também apresentou diferença estatisticamente significativa ($p < 0,01$) indicando que existe diferença entre as unidades experimentais.

A TABELA 20 apresenta os valores médios encontrados para a densidade aparente e resistência à compressão axial, corrigidos pela covariável densidade.

TABELA 20 – RESULTADO DO TESTE DE TUKEY PARA COMPARAÇÃO DAS MÉDIAS DAS TENSÕES E AS MÉDIAS DAS DENSIDADE APARENTES

| Tratamento | Teor de Aditivo e Adição (%) | Densidade aparente | Resistência à Compressão Axial (MPa) |
|-------------------|-------------------------------------|---------------------------|---------------------------------------------|
| 1 | Sílica 3% | 0,61 ^b (2,7%) | 1,06 ^b (14,4%) |
| 2 | Sílica 5% | 0,64 ^a (3,1%) | 1,15 ^b (12,3%) |
| 3 | Sílica 3% + Superplastificante 3% | 0,61 ^{ab} (1,9%) | 0,95 ^c (8,6%) |
| 4 | Sílica 5% + Superplastificante 3% | 0,63 ^{ab} (2,3%) | 0,94 ^c (9,7%) |
| 5 | Superplastificante 3% | 0,60 ^b (2,1%) | 0,95 ^c (13,2%) |
| 6 | Testemunha - Sem aditivos | 0,63 ^{ab} (5,6%) | 1,57 ^a (13,7%) |

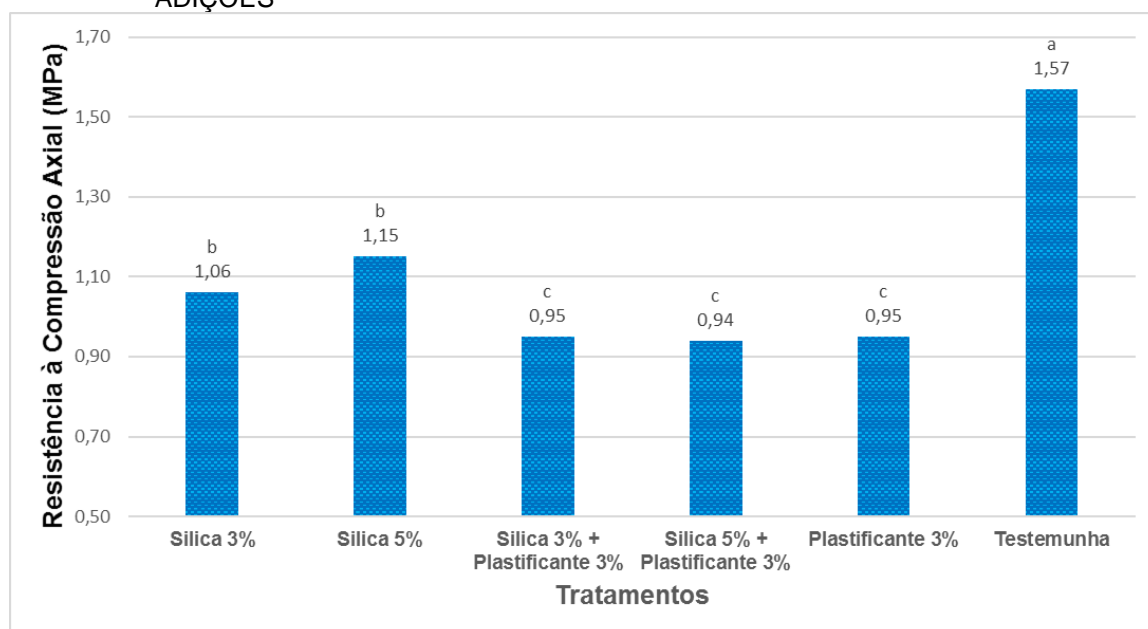
FONTE: A autora (2016).

NOTA: Médias seguidas pela mesma letra na mesma coluna não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. Valores entre parênteses indicam o coeficiente de variação.

Conforme apresentado na TABELA 20, observa-se que corpos de prova produzidos com 5% de sílica apresentaram valores médios de densidade aparente maiores quando comparados aos produzidos com 3% de sílica ou 3% de superplastificante. Nos corpos de prova produzidos com sílica e superplastificante não existem diferenças estatísticas significativas nos valores médios das densidades aparentes, independente da quantidade de aditivo utilizado.

A FIGURA 34 indica os valores médios de resistência à compressão axial, utilizando diferentes aditivos. Letras diferentes entre as colunas significam que houve diferença estatística entre os resultados de acordo com o teste de Tukey.

FIGURA 34 – VALORES MÉDIOS DOS RESULTADOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL AOS 28 DIAS DE CURA, UTILIZANDO DIFERENTES TEORES DE ADITIVOS E ADIÇÕES



FONTE: A autora (2016).

Dentre os corpos de prova dos compósitos de madeira-cimento utilizando somente o aditivo sílica, 3% e 5%, não houve diferença estatística entre os tratamentos, para os valores médios de resistência à compressão axial, e estes foram superiores estatisticamente aos corpos de prova que foram produzidos com superplastificante. Sendo que os corpos de prova dos compósitos de madeira-cimento produzidos com superplastificante, não apresentaram diferença estatística entre os tratamentos, para os valores médios de resistência à compressão axial.

Os corpos de prova dos compósitos de madeira-cimento produzidos sem aditivos apresentaram valores médio de resistência à compressão axial (1,57 MPa)

estatisticamente superiores aos corpos de prova dos compósitos de madeira-cimento produzidos com adições e/ou aditivos.

Esses resultados divergem dos encontrados na literatura, segundo os quais a adição de sílica da casca de arroz traz melhorias à resistência à compressão axial. Lima (2009) verificou resultados de resistência à compressão axial acima do indicado em norma para blocos de concreto substituindo o cimento do compósito por CCA na faixa entre 5% a 30%. Nos estudos de Torkaman, Ashori e Momtazi (2014) onde foram produzidos blocos de concreto leve para material de construção, os resultados mostraram que a substituição de 25% em peso do cimento por CCA resultaram em propriedades físico-mecânicas estatisticamente iguais aos blocos tradicionais. Mas cabe ressaltar que os blocos produzidos não eram de madeira-cimento, quando parte do agregado foi substituído por resíduos de madeira os valores médios de resistência à compressão axial diminuíram proporcionalmente ao acréscimo do resíduo de madeira.

Como neste estudo a relação madeira:cimento foi de 1:1,5, vazios apareceram, devido à dimensão das partículas da madeira e à baixa quantidade de cimento, desta forma o efeito da sílica tornou-se desnecessário, devido a finura da mesma, que em outros estudos acabou preenchendo vazios.

Quanto ao uso do superplastificante, estudos de Costa (2011) indicam que sua introdução em concreto misturado com cortiça conduziu a maiores perdas de resistência, as quais aumentam à medida que se amplia a dosagem de cortiça. Neste estudo, foi utilizado como pré-tratamento das partículas a suspensão de Ca(OH)_2 , o que possivelmente tenha tornado a utilização do superplastificante na mistura desnecessária. Nesse sentido, destaca-se que Parchen (2012) substituiu o superplastificante por Ca(OH)_2 , pois, quando adicionado às argamassas com componentes minerais, tem a capacidade de melhorar a trabalhabilidade da mistura, de modo que passa a ser desnecessária a utilização do superplastificante.

A cal além de ser um material aglomerante, possui, por sua finura, importantes propriedades plastificantes e retenção de água. Entre todos os plastificantes utilizados na preparação das argamassas, o mais recomendável para utilização é a cal hidratada Ca(OH)_2 , cujo desempenho como plastificante é comprovado em vários institutos de pesquisas. E seu uso é normalizado pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT).

Também importa ressaltar que, nos estudos de Castro (2015) em compósitos produzidos com partículas de madeira de *Escweilera coriaceae* e *Eschweilera odora*, não houve necessidade de uso de aditivos para melhorar a propriedade de ligação interna e o módulo de elasticidade.

6.5 CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos neste capítulo, as seguintes conclusões podem ser apresentadas:

- A utilização de sílica da casca de arroz como adição mineral para o cimento não apresentou ganhos neste estudo onde os compósitos foram produzidos com partículas retidas em peneira com malha 2,36 mm, devido à finura da sílica, e o tempo do ensaio que foi aos 28 dias;
- O pré-tratamento com suspensão de Ca(OH)_2 pode substituir a utilização de superplastificantes devido a propriedade plastificante do CaO nos compósitos de madeira-cimento, utilizando os traços descritos no estudo;
- A densidade aparente do compósito foi pouco afetada com a introdução de aditivos ou adições;
- O uso de adições minerais a base de sílica da casca de arroz e superplastificantes não alteram a resistência à compressão axial aos 28 dias dos compósitos produzidos com partículas de *Pinus* spp retidas em peneira com malha de 2,36 mm.

7 AVALIAÇÃO DOS EFEITOS DAS DIFERENTES PROPORÇÕES DE ÁGUA, CIMENTO E MADEIRA, NA RESISTÊNCIA E NO CUSTO, DOS COMPÓSITOS DE MADEIRA-CIMENTO

7.1 RESUMO

Neste capítulo foram avaliados os efeitos de diferentes proporções de água, cimento e madeira, na resistência e custo de compósitos de madeira-cimento. Foram produzidos corpos de prova cilíndricos utilizando cimento Portland tipo CP II-Z e partículas de *Pinus* spp retidas em peneira com malha de 2,36 mm, que tiveram pré-tratamento com suspensão de $\text{Ca}(\text{OH})_2$. O plano experimental consistiu de seis tratamentos, com diferentes fatores de relações madeira:cimento e adições de água. Os tratamentos apresentaram diferenças estatísticas nos resultados médios de densidade aparente e resistência à compressão axial realizados aos 28 dias de idade. Compósitos com relação madeira:cimento de 1:1,5 e adição de água igual a 30% apresentaram melhores resultados estatísticos no ensaio de resistência à compressão axial, considerando a densidade como covariável.

7.2 INTRODUÇÃO

Estudos indicam que a resistência dos compósitos de madeira:cimento dependem de muitas características, tais como: a espécie e geometria da madeira utilizada; a característica do material ligante; o processo de cura realizado; o índice de inibição entre a madeira e o cimento; a relação água:cimento utilizada na produção; e a relação madeira:cimento.

Conforme Papadopoulos (2008), o aumento de cimento na relação madeira:cimento pode trazer incremento ao módulo de elasticidade, redução em inchamento e espessura e aumento da ligação interna e resistência mecânica; isso porque, devido ao cimento hidratado ser um material com módulo de elasticidade superior ao da madeira, a rigidez do compósito aumenta para maiores proporções de cimento na mistura. Nos estudos realizados por Moslemi e Pfister (1997), em que a relação madeira:cimento foi alterada de 1:1,5 para 1:3,0, concluiu-se que maiores valores para o módulo de elasticidade são encontrados com menores índices de madeira:cimento, visto que o cimento hidratado é um material mais rígido do que a madeira. O contrário acontece com valores de módulo de ruptura, uma vez que

menores índices de madeira:cimento reduzem o seu valor. Por sua vez, assim como outros pesquisadores, Savastano Jr (2000) afirma que a densidade, a absorção de água e a porosidade são propriedades físicas que estão relacionadas entre si; desse modo, à medida que se aumenta a quantidade de partículas de madeira, a absorção de água aumenta e a densidade diminui.

Para Zhou e Kamdem (2002), a madeira é um agregado que aumenta de volume quando misturado ao cimento; com isso, as tensões que ocorrem na interface cimento-agregado tornam-se mais difusas, resultando em um aumento da resistência à tensão aplicada. A quantidade de cimento deve ser suficiente para a formação de uma matriz completa; assim, quando se diminui a relação madeira:cimento, as partículas ficam melhor revestidas com cimento, que atua como um adesivo para ligar os agregados em conjunto. Nos estudos de Lee (1985), quando se aumentou a relação madeira:cimento, algumas maravalhas não receberam revestimento adequado de cimento, resultando em má ligação. Isso foi confirmado nos estudos de Del Menezzi, Castro e Souza (2007), que por sua vez, encontraram baixos valores para ligação interna e aumento no inchamento, o que se deve à relação madeira:cimento utilizada (1:1) em massa, não havendo quantidade suficiente de cimento para encapsular as partículas de madeira.

Torkaman, Ashori e Momtazi (2014) relataram que as pesquisas sobre a influência da relação madeira:cimento de compósitos normalmente realizam ensaios de resistência à flexão e tração, porém, se o compósito tiver aplicação que exija esforço à compressão axial, esse ensaio também deverá ser requisitado. Al Rim et al. (1999) confirmam que a resistência à compressão axial, assim como os fatores citados anteriormente, relaciona-se com a quantidade de madeira utilizada, diminuindo a densidade do compósito e sua resistência à compressão axial à medida que se utiliza mais madeira. Nos estudos realizados por Torkaman, Ashori e Momtazi (2014), os valores médios de resistência à compressão axial diminuíram à medida que os autores aumentaram a proporção de madeira na mistura. Ocorrendo uma redução de 75% na resistência à compressão axial com a substituição de 25% do peso de cimento por fibras, os compósitos atingiram um resultado médio de resistência à compressão axial de 1,6 MPa.

Apesar de as resistências à flexão, tração e compressão diminuírem com a relação madeira:cimento, outras vantagens podem ser atribuídas a esses compósitos;

entre elas, Zhou e Kamdem (2002) relataram que as partículas de madeira são mais baratas quando comparadas ao cimento, de forma que, ao adicionar grandes quantidades de madeira, se reduz o custo e, ainda, se produzem compósitos de baixa densidade. Al Rim et al. (1999) completam afirmando que o processo de redução de peso também reduz a condutividade térmica. Entretanto, dependendo das propriedades desejadas para o compósito, a relação madeira:cimento deve ser ajustada, porque se o objetivo é baixa densidade e não obter alta resistência o aumento da proporção de madeira se justifica. Com altos índices de madeira:cimento, pode-se elevar a porosidade e, assim, obter produtos com bom isolamento térmico (FRYBORT et al., 2008).

Nos estudos de Al Rim et al. (2009), utilizando cerca de 35% de madeira como agregado, obteve-se densidade de 600kg/m^3 , atendendo aos critérios da classe III da *International Union of Laboratories and Experts in Construction Materials, Systems and Structures* (RILEM), segundo os quais a resistência à compressão axial deve ser maior que 0,5 MPa e a condutividade térmica, menor que 0,3 W/mK. Já Parchen (2012), ao utilizar pré-tratamento nas partículas com solução de Ca(OH)_2 , produziu um compósito com baixo custo e baixa densidade (média de $0,744\text{ g/cm}^3$), aplicando a relação madeira:cimento de 0,9:1 em massa. Seus melhores resultados foram para partículas pré-tratadas com suspensão de Ca(OH)_2 e secas ao ar por um período de sete dias, obtendo média de resultados para compressão axial de $21,91\text{kgf/cm}^2$ e densidade média de $0,77\text{ g/cm}^3$. Por sua vez, Lima e Iwakiri (2011), ao substituir 50% do agregado miúdo (areia) por partículas de *Pinus*, que representou 25,32% no total de agregados, obtiveram resistência máxima à compressão axial de 5,65 MPa aos 28 dias, com densidade de $1,96\text{ g/cm}^3$. Esses altos valores de compressão axial e densidade devem-se ao fato do traço utilizado ser de 1:10 e de somente 50% do agregado ter sido substituído por *Pinus* spp, comprovando mais uma vez que uma baixa relação madeira:cimento gera força de compressão axial e densidade maiores.

Muitos autores, ao calcular a quantidade de água necessária para a mistura, utilizam a equação sugerida por Simatupang (1979):

$$Ca = R_{a/c} * C + (PSF - U) * M \quad (\text{EQUAÇÃO 07})$$

Em que:

- Ca = consumo de água (kg);
- $R_{a/c}$ = relação água:cimento;
- C = consumo de cimento (kg);
- PSF = ponto de saturação das fibras (adotado 30%);
- U = teor de umidade da madeira (%);
- M = quantidade de madeira (kg).

Destaca-se que os valores da relação água:cimento podem ser alterados de acordo com o estudo, podendo ser de 0,35 a 0,50, devido à umidade das partículas de madeira e dimensionamento das mesmas. Castro (2015) adaptou a equação sugerida, ocorrendo um acréscimo de 15% de água, com base no peso seco do cimento, uma vez que, em seu estudo, os corpos de prova foram confeccionados pelo método de vibro-compactação, e não prensados.

7.2.1 Objetivo

Esta etapa do trabalho teve como objetivo avaliar os efeitos de diferentes proporções de água, cimento e madeira, na densidade, resistência à compressão axial e custo de compósitos de madeira-cimento.

7.3 MATERIAIS E MÉTODOS

Foram utilizados cavacos de *Pinus* spp, procedentes de uma madeireira localizada no município de Tunas do Paraná, obtidos por meio de ações mecânicas de descascadores e picadores, comercializados como biomassa.

7.3.1 Preparação das partículas

Os cavacos secos foram processados em um moinho de martelos utilizando-se uma peneira de 1" (2,54 cm) na saída da ação de moagem, limitando, assim, o

tamanho máximo dos cavacos produzidos. Após a moagem, o material foi peneirado e somente o material passante na peneira de 4,75 mm e retido na de 2,36 mm foi utilizado nesta etapa da pesquisa. Conforme detalhamento metodológico apresentado no capítulo 3.

7.3.2 Aglomerantes

Para a produção dos corpos de prova dos compósitos de madeira-cimento utilizou-se o aglomerante hidráulico cimento Portland tipo CP II-Z. Como aglomerante aéreo foi utilizada a cal aérea ou CaO (óxido de cálcio), conhecida no mercado consumidor como cal virgem. O óxido de cálcio foi hidratado, resultando dessa reação uma suspensão de Ca(OH)_2 .

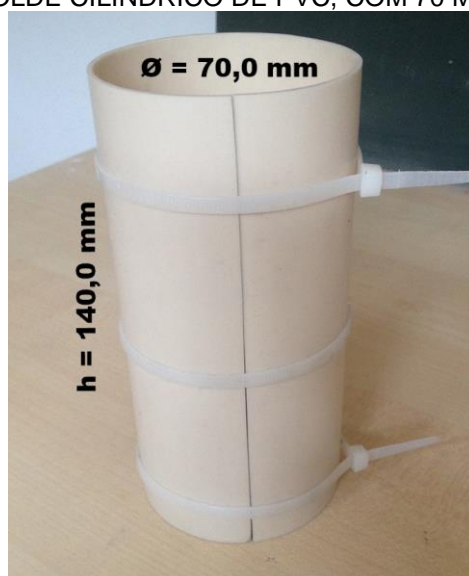
7.3.3 Equipamentos

Para a confecção dos corpos de prova foi utilizada uma mesa vibratória, desenvolvida por Parchen (2012) no Laboratório de Painéis da UFPR, formada por um vibrador elétrico trifásico com ajuste mecânico dos excêntricos promotores da energia de vibração, com carga de impacto vertical de 220 N a 3.000 RPM, acoplado a uma prancha de compensado flexível.

7.3.4 Moldes para os corpos de prova

Para confecção dos corpos de prova, para ensaio de compressão axial, foram construídos moldes cilíndricos produzidos com tubos de PVC. Os moldes apresentavam dimensões de 70 mm de diâmetro e 140 mm de altura, possuindo um volume interno líquido de $538,8 \text{ cm}^3$ e abertura ao longo da geratriz, fechados por cintas plásticas para facilitar o desmolde, conforme figura a seguir.

FIGURA 35 – MOLDE CILÍNDRICO DE PVC, COM 70 MM DE DIÂMETRO



FONTE: A autora (2016).

7.3.5 Manufatura dos corpos de prova

Para a produção dos corpos de prova, foi utilizada a relação água:cal para o pré-tratamento das partículas igual a 6,25:1, conforme estudos dos capítulos anteriores. Por sua vez as relações estudadas de madeira:cimento foram de 1:1,5 , de 1:2,0 e de 1:2,2. Esta razão máxima foi escolhida devido aos resultados de Castro (2015), em que compósitos com proporções maiores de cimento geraram aumento na densidade aparente. Também foram estudadas duas porcentagens de adição de água sendo elas de 20% e 30% em relação ao peso seco do cimento. Observa-se que esta quantidade de água é adicional, a quantidade de água total é a soma da água da suspensão de Ca(OH)_2 e estes valores.

O plano experimental consistiu do estudo de seis tratamentos, com sete corpos de prova cada, totalizando 42 corpos de prova, dos quais metade utilizaram adição de água igual a 20% e outra metade adição de 30%, conforme o delineamento experimental apresentado no QUADRO 10.

QUADRO 10 – DELINEAMENTO EXPERIMENTAL

| Tratamento | Adição de Água | Madeira:cimento |
|------------|----------------|-----------------|
| A | 30% | 1:1,5 |
| B | 30% | 1:2,0 |
| C | 30% | 1:2,2 |
| D | 20% | 1:1,5 |
| E | 20% | 1:2,0 |
| F | 20% | 1:2,2 |

FONTE: A autora (2016).

7.3.5.1 Tratamentos A, B e C

Com base na norma NBR 5738 (ABNT, 2008b), os corpos de prova cilíndricos foram confeccionados com 7 cm de diâmetro e 14 cm de altura, utilizando-se uma adição de água igual a 30% do peso seco do cimento. A quantidade de material para cada um dos tratamentos - A, B e C - encontra-se no QUADRO 11.

QUADRO 11 – QUANTIDADE DE MATERIAIS PARA PRODUÇÃO DOS CORPOS DE PROVA PARA OS TRATAMENTOS A, B e C

| Material | Tratamento A | Tratamento B | Tratamento C |
|--------------------------------|--------------|--------------|--------------|
| Cimento | 1.612 g | 1.820 g | 1.884 g |
| Resíduo de <i>Pinus</i> | 1.240 g | 1.046,5 g | 984,8 g |
| Suspensão de Ca(OH)_2 | 1.240 g | 1.046,5 g | 984,8 g |
| Água Adicional (30%) | 483,6 g | 546 g | 565,2 g |

FONTE: A autora (2016).

Para confecção dos corpos de prova inicialmente foi preparada uma suspensão de Ca(OH)_2 , na proporção de 6,25 de água para 1,00 em massa de CaO.

As partículas foram inicialmente colocadas em uma bandeja utilizada na construção civil e misturadas manualmente, com o mesmo peso de suspensão de Ca(OH)_2 . Durante esta mistura a água da suspensão penetra nas partículas de madeira, e o dióxido de carbono CO_2 presente na atmosfera, se combina com o hidróxido de cálcio, durante a fase de carbonatação ou secagem, se transformando quimicamente em (CaCO_3) que mineraliza a superfície externa da partícula de madeira. Conforme mostrado na FIGURA 36.

FIGURA 36 – PARTÍCULAS SEM PRÉ-TRATAMENTO (ESQ), PARTÍCULAS COM MATERIAL CARBONATADO (DIR)



FONTE: A autora (2016).

Depois de 15 minutos, foram adicionados cimento e água, conforme quantidade constante no quadro anterior. Com todos os materiais misturados manualmente até a completa homogeneização, foram moldados os corpos de prova com o auxílio da mesa vibratória.

Os moldes foram preenchidos em três fases, sendo a mesa ligada por 30 segundos a cada etapa para adensamento do material. Após o total preenchimento dos moldes, eles foram cobertos por uma tampa circular produzida de MDF com 70 mm de diâmetro e 3 mm de espessura, mantendo-os perpendicular a geratriz do cilindro. A mistura foi mantida dentro do molde por um período de 48 horas. Após esse período, o molde foi aberto e os corpos de prova conservados ao ar livre até completar o tempo total de cura de 28 dias.

7.3.5.2 Tratamentos D, E e F

Com base na norma NBR 5738 (ABNT, 2008b), os corpos de prova cilíndricos foram confeccionados com 7 cm de diâmetro e 14 cm de altura, utilizando-se uma adição de água igual a 20% do peso seco do cimento. A quantidade de material para cada um dos tratamentos – D, E e F - encontra-se no QUADRO 12.

QUADRO 12 – QUANTIFICAÇÃO DE MATERIAIS PARA PRODUÇÃO DOS CORPOS DE PROVA PARA OS TRATAMENTOS D, E e F

| Material | Tratamento A | Tratamento B | Tratamento C |
|--------------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| Cimento | 1.612 g | 1.820 g | 1.884 g |
| Resíduo de <i>Pinus</i> | 1.240 g | 1.046,5 g | 984,8 g |
| Suspensão de Ca(OH)_2 | 1.240 g | 1.046,5 g | 984,8 g |
| Água Adicional (20%) | 322,4 g | 364 g | 376,8 g |

FONTE: A autora (2016).

Para a confecção dos corpos de prova foi seguida a ordem da mistura dos ingredientes e o preenchimento dos moldes iguais aos tratamentos anteriores.

7.3.6 Determinação das propriedades físicas e mecânicas

Após a cura, os corpos de prova foram pesados, medidos e submetidos ao ensaio de compressão axial, conforme a NBR 5739 (ABNT, 2007).

7.3.7 Custo dos compósitos

Para cálculo do custo dos corpos de prova dos compósitos de madeira-cimento, foram utilizadas composições de preços unitários. Para este cálculo foi considerado o preço das partículas vendidas como biomassa por madeireiras do município de Tunas do Paraná, tendo sido também calculados os custos relativos à secagem, moagem e classificação.

Para o cálculo das composições foram utilizados os outros preços de materiais (cimento e cal) obtidos nos mercados de construção civil de Curitiba.

7.3.8 Análise estatística

Para este estudo, foi realizado um delineamento experimental inteiramente casualizado, com arranjo fatorial para os tratamentos, e avaliada a interação entre dois fatores: adição de água e relação madeira:cimento. Para verificar o efeito dos tratamentos sobre as propriedades dos corpos de prova, foi realizada uma análise de variância considerando a densidade uma covariável.

Os tratamentos foram avaliados quanto à sua homogeneidade pelo teste de Bartlett. O procedimento para comparação de médias foi o Tukey-Kramer e, para auxílio nos cálculos, foram utilizados os *softwares* Statgraphics Centurion XV e Statistica 10.

7.4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

7.4.1 Propriedades físicas e mecânicas

Os resultados médios da densidade aparente e resistência à compressão axial (28 dias) dos corpos de prova estão apresentados na TABELA 21.

TABELA 21 – RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL E DENSIDADE APARENTE DOS CORPOS DE PROVA DOS COMPÓSITOS DE MADEIRA-CIMENTO PARA DIFERENTES RELAÇÕES DE ÁGUA, MADEIRA E CIMENTO

| Tratamento | Adição de Água | Madeira:cimento | Densidade aparente (g/cm ³) | Resistência à compressão Axial (MPa) |
|------------|----------------|-----------------|-----------------------------------------|--------------------------------------|
| A | 30% | 1:1,5 | 0,56 (2,9%) | 0,99 (11,0%) |
| B | 30% | 1:2,0 | 0,64 (2,6%) | 1,07 (19,2%) |
| C | 30% | 1:2,2 | 0,77 (1,7%) | 1,84 (7,8%) |
| D | 20% | 1:1,5 | 0,61 (3,7%) | 1,01 (18,5%) |
| E | 20% | 1:2,0 | 0,67 (2,6%) | 1,05 (12,2%) |
| F | 20% | 1:2,2 | 0,72 (2,0%) | 1,14 (5,8%) |

FONTE: A autora (2016).

SENDO: Valores entre parênteses indicam o coeficiente de variação.

Nos tratamentos que utilizaram 30% de água, a densidade aparente aumentou 37,5% da relação de 1:2,2 de madeira:cimento, em comparação com a de 1:1,5 de madeira:cimento. Entendendo que a densidade aparente de 0,77 g/cm³ é baixa para compósitos de madeira-cimento, quando comparado a concretos leves de acordo com a NBR 12655 (ABNT, 2015), a utilização da relação madeira:cimento de 1:2,2 pode ser fundamentada, pois a tensão ficou 85,8% maior que a da relação 1:1,5. Esse fato corrobora o estudo de Zhou e Kamdem (2002), no qual se afirma que, quanto menor a relação madeira:cimento, maior o revestimento das partículas por cimento, otimizando as propriedades mecânicas dos compósitos.

Por outro lado, caso o objetivo do compósito seja uma densidade menor que 0,60g/cm³ a melhor relação madeira:cimento é de 1:1,5.

Para ajuste, a densidade dos corpos de prova foi tratada como uma covariável durante a análise estatística, tendo sido os resultados padronizados para uma densidade fixa.

Na TABELA 22, são apresentados os resultados da análise de variância dos dados referentes aos ensaios de compressão axial, e os valores de Qui-quadrado referentes ao teste de Bartlett.

TABELA 22 – ANÁLISE DE VARIÂNCIA PARA A RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL DOS CORPOS DE PROVA DOS COMPÓSITOS DE MADEIRA-CIMENTO

| Fonte de variação | SQ | Grau de liberdade | Quadrado médio | F | P |
|--------------------------|-------|-------------------|---------------------|-------|----------------------|
| Densidade | 0,497 | 1 | 0,497 | 61,92 | 0,0000** |
| A: adição de água | 0,786 | 1 | 0,786 | 97,91 | 0,0000** |
| B: madeira:cimento | 0,383 | 2 | 0,191 | 23,88 | 0,0000** |
| Interações | | | | | |
| AB | 0,048 | 2 | 0,024 | 3,01 | 0,0622 ^{ns} |
| Coefficiente de variação | | | 10,78% | | |
| Qui-quadrado | | | 7,905 ^{ns} | | |

FONTE: A autora (2016).

NOTAS: ns = não significativo. ** = significativo a 1% de probabilidade.

Ao analisar os resultados da TABELA 22, verifica-se que a utilização da densidade como covariável foi estatisticamente significativa ($p < 0,01$). A interação entre os fatores A e B não foi estatisticamente significativa indicando que seus efeitos são independentes. Por sua vez, os fatores principais adição de água e relação madeira:cimento apresentaram diferenças estatisticamente significativas ($p < 0,01$), indicando que existe diferença entre as unidades experimentais.

As médias das tensões máximas de resistência à compressão axial, corrigidas pela covariável densidade, para a adição de água e relação madeira:cimento são apresentadas na TABELA 23.

TABELA 23 – RESULTADO DO TESTE DE TUKEY DOS VALORES DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL AOS 28 DIAS PARA DIFERENTES ADIÇÕES DE ÁGUA E RELAÇÕES DE MADEIRA:CIMENTO

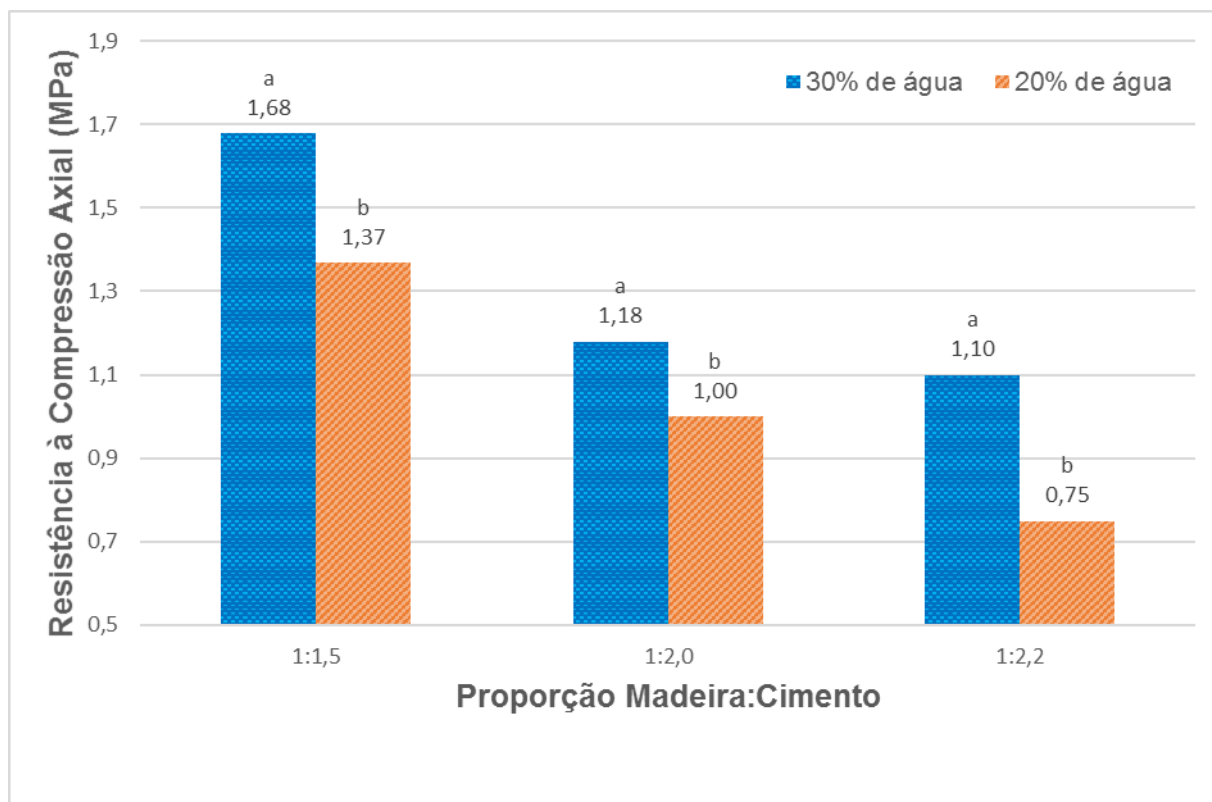
| Adição de Água | Resistência à Compressão Axial aos 28 dias (MPa) | | |
|----------------|--------------------------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| | Relação Madeira:Cimento 1:1,5 | Relação Madeira:Cimento 1:2,0 | Relação Madeira:Cimento 1:2,2 |
| 30% | 1,683 ^a | 1,183 ^a | 1,099 ^a |
| 20% | 1,372 ^b | 1,005 ^b | 0,749 ^b |

FONTE: A autora (2016).

NOTA: Médias seguidas pelas mesmas letras nas colunas não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Na FIGURA 37 estão apresentados os valores médios das tensões máximas de resistência à compressão axial, comparando os tratamentos com 20% e 30% de água, para diferentes proporções de madeira:cimento.

FIGURA 37 – RESULTADOS MÉDIOS DE COMPRESSÃO AXIAL PARA TRATAMENTOS COM 20% E 30% DE ÁGUA PARA DIFERENTES PROPORÇÕES DE MADEIRA:CIMENTO



FONTE: A autora (2016).

Os corpos de prova dos compósitos de madeira-cimento produzidos com a adição de água igual a 30% apresentaram valores médios de resistência à compressão axial estatisticamente superiores aos produzidos com a adição de água igual a 20% para todas as proporções de madeira:cimento utilizadas. Observa-se que esta adição de água não pode ser considerada como a relação final de água:cimento, devido a água presente no Ca(OH)_2 utilizado para pré-tratamento das partículas.

Para o cálculo da relação água:cimento (A/C), utilizou-se a massa atômica dos elementos contidos na CaO , sendo possível desta forma determinar a quantidade de H_2O necessária para a reação de hidratação do CaOH , sendo esta igual a 22,4% da água utilizada na preparação da suspensão. Cabe-se observar que da suspensão resultante possivelmente 64% migrou para dentro do conteúdo celular das partículas, restando 36% nas partes externas das mesmas.

Sendo assim a relação A/C variou entre 44% a 51% nos corpos de prova produzidos com 30% de adicional de água, e entre 34% a 41% nos corpos de prova produzidos com 20% de adicional de água.

Esta relação de 44% a 51% está de acordo com os estudos realizados por outros pesquisadores, tais como os estudos de Simatupang (1979) que utilizou relações de água:cimento entre 0,45 a 0,55 variando conforme a relação madeira:cimento; já nos estudos de Castro (2015) utilizou-se os valores de Simatupang (1979) acrescidos em 15% a mais de água baseado no peso do cimento seco. Nesse sentido, Simatupang (1979) ressalta que a falta de água é mais prejudicial ao compósito do que seu excesso.

As médias das tensões máximas de resistência à compressão axial considerando a adição de água igual a 30%, corrigidas pela covariável densidade são apresentadas na TABELA 24.

TABELA 24 – RESULTADO DO TESTE DE TUKEY DOS VALORES DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL CORPOS DE PROVA COM 30 % DE ADIÇÃO DE ÁGUA E DIFERENTES PROPORÇÕES DE MADEIRA:CIMENTO

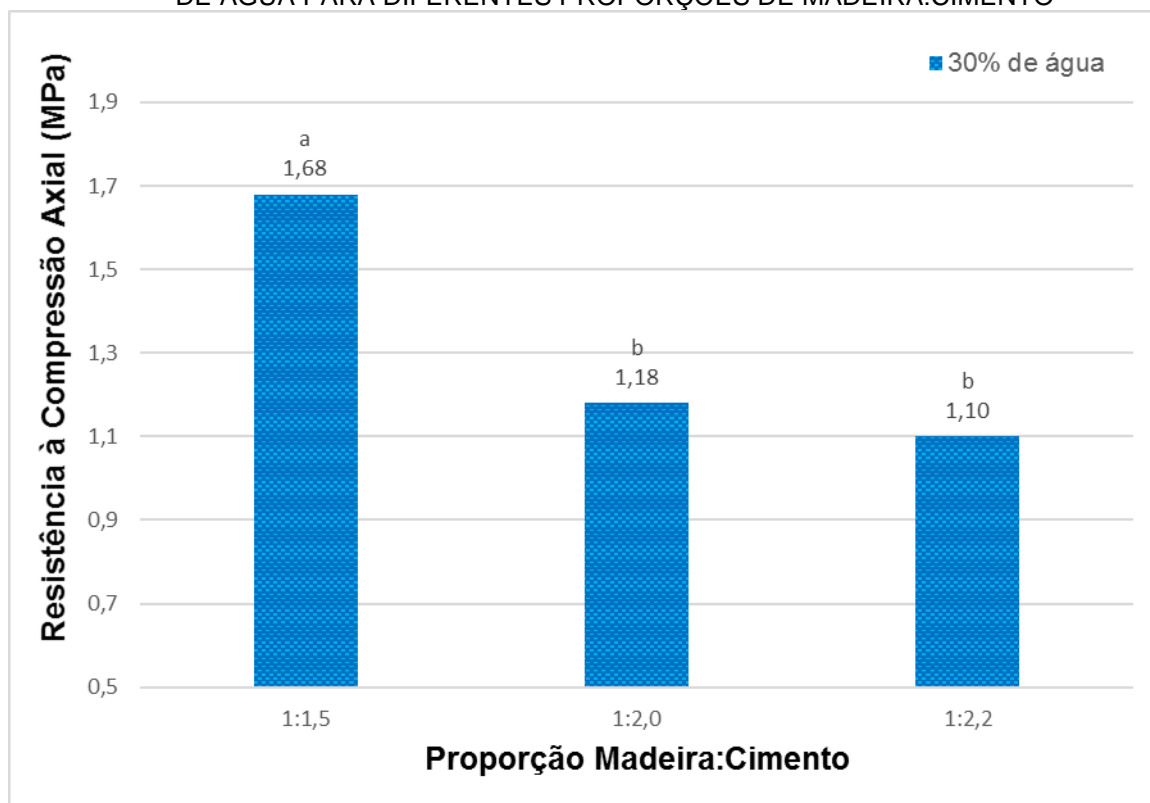
| Madeira:cimento | Adição de água - 30% |
|-----------------|----------------------|
| 1:1,5 | 1,68 ^a |
| 1:2,0 | 1,18 ^b |
| 1:2,2 | 1,10 ^b |

FONTE: A autora (2016).

NOTA: Médias seguidas pelas mesmas letras nas colunas não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade

A FIGURA 38 apresenta os valores médios encontrados para a propriedade de resistência à compressão axial para os corpos de prova produzidos com a adição de água igual a 30% do peso seco do cimento.

FIGURA 38 – RESULTADOS MÉDIOS DE COMPRESSÃO AXIAL PARA TRATAMENTOS COM 30% DE ÁGUA PARA DIFERENTES PROPORÇÕES DE MADEIRA:CIMENTO



FONTE: A autora (2016).

NOTA: Letras diferentes acima de colunas indicam diferença estatística a um nível de 95%.

Conforme observado na FIGURA 38 corpos de prova dos compósitos de madeira-cimento produzidos com proporção madeira:cimento igual a 1:1,5 apresentaram valor médio de resistência à compressão axial de 1,68 MPa, estatisticamente superior aos demais corpos de prova dos compósitos de madeira-cimento produzidos com outras proporções de madeira:cimento. A esse respeito, os estudos de Al Rim et al. (1999) indicaram que, quanto maior a quantidade de cimento, maiores os valores de compressão axial encontrados. Observa-se que a proporção madeira:cimento igual a 1:1,5 foi o traço estudado com menor quantidade de cimento, e seus valores só foram estatisticamente superiores quando a densidade foi utilizada como covariável, conforme visto na comparação entre os valores apresentados nas TABELA 21 (valores sem utilizar a covariável) e TABELA 23 (valores utilizando a covariável). Os corpos de prova dos compósitos de madeira-cimento produzidos com

proporção de madeira:cimento igual a 1:2,0 e 1:2,2 apresentaram o valor médio de resistência à compressão axial estatisticamente iguais, sendo que o primeiro apresentou valores médios de densidades aparentes mais baixo.

7.4.2 Custo dos compósitos

Os QUADRO 13, 14 e 15 apresentam a quantidade e custo de cada insumo e o custo final para a produção de sete corpos de prova para cada tratamento estudado.

QUADRO 13 – CUSTO PARA PRODUÇÃO DOS TRATAMENTOS A e D

| Material | Tratamentos com relação madeira:cimento de 1:1,5 | Custo (R\$) |
|-------------------------|--------------------------------------------------|-------------|
| Cimento | 1.612 g | 0,56 |
| Resíduo de <i>Pinus</i> | 1.240 g | 0,40 |
| Ca(OH) ₂ | 1.240 g | 0,09 |
| Água | 483,6 g | 0,01 |
| Custo Total | | R\$ 1,06 |

FONTE: A autora (2016).

NOTA: Quantidades e preços para produção de sete corpos de prova

QUADRO 14 – CUSTO PARA PRODUÇÃO DOS TRATAMENTOS B e E

| Material | Tratamentos com relação madeira:cimento de 1:2,0 | Custo (R\$) |
|-------------------------|--------------------------------------------------|-------------|
| Cimento | 1.820 g | 0,64 |
| Resíduo de <i>Pinus</i> | 1.046,5 g | 0,34 |
| Ca(OH) ₂ | 1.046,5g | 0,08 |
| Água | 546 g | 0,01 |
| Custo Total | | R\$ 1,07 |

FONTE: A autora (2016).

NOTA: Quantidades e preços para produção de sete corpos de prova

QUADRO 15 – CUSTO PARA PRODUÇÃO DOS TRATAMENTOS C e F

| Material | Tratamentos com relação madeira:cimento de 1:2,2 | Custo (R\$) |
|-------------------------|--------------------------------------------------|-------------|
| Cimento | 1.884 g | 0,66 |
| Resíduo de <i>Pinus</i> | 984,8 g | 0,32 |
| Ca(OH) ₂ | 984,8g | 0,07 |
| Água | 565,2 g | 0,01 |
| Custo Total | | R\$ 1,06 |

FONTE: A autora (2016).

NOTA: Quantidades e preços para produção de sete corpos de prova

Observa-se que, nos tratamentos A e D, o consumo de cimento foi menor comparado ao dos outros tratamentos, porém houve maior consumo de resíduos de partículas de *Pinus* spp. Os corpos de prova dos compósitos de madeira-cimento produzidos apresentaram valores de custo próximos. Portanto, a decisão do

acrécimo de cimento está relacionada somente ao aumento da densidade aparente, e aumento da resistência à compressão axial.

7.5 CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos neste capítulo, as seguintes conclusões podem ser apresentadas:

- Maiores proporções de cimento na mistura aumentam a densidade aparente dos compósitos;
- A relação com menor quantidade de cimento, traço madeira:cimento igual a 1:1,5 resultou em maior resistência à compressão axial dos compósitos considerando a densidade como covariável;
 - Os compósitos produzidos com maior adição de água, igual a 30%, resultou em maior resistência à compressão axial dos compósitos, porque as partículas já possuíam água do pré-tratamento;
- O acréscimo de 17% de cimento entre os corpos de prova dos compósitos de madeira-cimento estudados não causou acréscimo nos custos. Pois neste estudo com o acréscimo de cimento existiu a diminuição da quantidade de madeira.

8 PRODUÇÃO DE BLOCOS VAZADOS DE MADEIRA-CIMENTO DE BAIXA DENSIDADE PARA UTILIZAÇÃO EM ALVENARIA

8.1 RESUMO

Este capítulo avalia a utilização de cavacos de *Pinus* spp provenientes de resíduos de indústria madeireira na produção de blocos vazados de concreto simples com baixa densidade destinados às alvenarias internas. Para tanto, foram produzidos blocos com cavacos de *Pinus* spp passantes pela peneira de 4,75 mm e retidos na de 2,36 mm, os quais foram previamente tratados com suspensão de Ca(OH)_2 . Os blocos foram produzidos a partir de três traços preparados para o compósito madeira:cimento, sendo eles: 1:1,5 e 1:2,2 (utilizando CP II-Z) e 1:2,2 (utilizando CPV-ARI). A avaliação de suas propriedades físicas (massa específica, absorção de água, teor de umidade e condutividade térmica) e mecânicas (resistência à compressão axial) foi realizada conforme a NBR 12118 (ABNT, 2014c) e ASTM C-518.

Obtiveram-se resultados satisfatórios para os três traços utilizados, verificando-se um aumento na resistência à compressão axial para maiores proporções de cimento, o que também acarretou o aumento da densidade. O maior valor de resistência à compressão axial aos 28 dias foi alcançado com os blocos produzidos com traço de 1:2,2, independentemente do cimento utilizado. Além disso, os blocos produzidos apresentaram características de isolamento térmico superiores às dos materiais cimentícios convencionais.

8.2 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, tem crescido a atenção dada ao aquecimento global, fenômeno que se deve à liberação de gases causadores do efeito estufa. Apesar de existirem incertezas associadas à mudança de clima, a maioria da comunidade científica internacional reconhece que o atual aquecimento do planeta é fruto da atividade humana. De fato, desde 1850, ocorreu um aumento total na superfície de $0,76^\circ\text{C}$; nos polos, isso é ainda mais marcado: no Ártico, por exemplo, houve o dobro do aumento do nível global nos últimos 100 anos (IPCC, 2013).

Segundo o Instituto Carbono Brasil (2014), os principais gases causadores do efeito estufa são o CO_2 , o metano e o óxido nitroso. O aumento de CO_2 na atmosfera tem sua origem principal na queima de combustíveis e mudanças na utilização do solo

(como o desmatamento); o metano e o óxido nitroso são provenientes principalmente das emissões da agricultura. Quanto aos níveis, em maio de 2013, os de CO₂ atingiram o recorde de 400 ppm no ar (IPCC, 2013).

De acordo com Torkaman, Ashori e Momtazi (2014), nos próximos anos a indústria da construção terá o desafio de incorporar a sustentabilidade em seus processos de produção; entre várias maneiras, uma será a produção de produtos que contribuam para a redução de CO₂ na atmosfera, incorporando resíduos de outras atividades industriais em seus processos. Nesse sentido, Hon e Shiraiashi (2001) indicaram que o problema da eliminação de resíduos tornou-se um assunto inevitável. Os enormes volumes produzidos poderiam ser incinerados ou decompostos, mas esse tipo de eliminação envolve uma grande emissão de CO₂ para a atmosfera, que deve ser evitada. Dessa forma, devem-se desenvolver alternativas de reutilização e reciclagem, reduzindo simultaneamente o volume de resíduos de madeira e mantendo o CO₂ armazenado até quando possível.

O resíduo florestal é todo e qualquer material resultante da colheita ou do processamento da madeira ou outro recurso florestal que permaneça sem utilização definida ao longo do processo (NOLASCO, 2000). Normalmente, seu uso não passa dos limites industriais, servindo de combustível para geração de energia (SOUZA, 2006). Além disso, devido ao volume gerado, grande parte dos resíduos é empilhada, permanecendo dessa forma por muitos anos e, atualmente, encontrando-se em diversos estágios de decomposição (RECH, 2002). No entanto, segundo Parchen (2012), começa a ocorrer uma mudança de rumo a esse respeito e o que se entendia como “entulho” (material inútil) passa a ter um novo aspecto de resíduo renovável.

Os produtos fabricados com madeira armazenam CO₂, um exemplo desses produtos são os compósitos de madeira-cimento. Nesse caso, o cimento é utilizado como aglomerante e misturado com a madeira, como agregado. Vários autores citam como vantagens desse produto: o isolamento térmico e acústico, o alto grau de resistência ao fogo e a impactos, as ótimas características mecânicas além da resistência à ataques biológicos (IWAKIRI, 2005; LIMA, 2009; SAVASTANO JR, 2000). Ainda nesse sentido, Semple e Evans (2004) indicaram que a baixa densidade desses compósitos permite sua utilização na produção de painéis de fechamento, forros, telhas e elementos de vedação; por sua vez, Lima (2009) utiliza resíduos de

toras de *Pinus* spp como substituição ao agregado miúdo de blocos de concreto para produção de blocos para alvenaria estrutural.

A NBR 6136 (ABNT, 2014b) define blocos vazados de concreto simples como um componente para execução de alvenaria, com ou sem função estrutural, vazado nas faces superior e inferior, cuja área líquida é igual ou inferior a 75% da área bruta. Surgiram por volta de 1880 nos Estados Unidos e na Inglaterra; no Brasil, existem registros de sua utilização nos anos 1940, com a construção de 2.400 residências no Rio de Janeiro (LORDSLEEM et al., 2008; SALVADOR FILHO, 2007). Atualmente, há um novo conceito de blocos de concreto, mais leves que os tradicionais. De acordo com a NBR 12655 (ABNT, 2015), o concreto pode ser classificado conforme sua massa específica no estado endurecido; assim, o concreto denominado leve possui massa específica não menor que 800 kg/m^3 , mas não excede a 2.000 kg/m^3 .

Segundo Del Coz Díaz et al. (2009), o grande interesse da indústria da construção pelos blocos mais leves deve-se à sua baixa densidade e, especialmente, às propriedades de isolamento térmico. Uma vez que a maioria dos elementos estruturais é feita de concreto armado, sendo os painéis e paredes também fabricados com produtos à base de cimento Portland, existe uma constante preocupação com os problemas de tamanho e peso dos elementos. A fim de reduzir o peso das estruturas, podem-se utilizar blocos leves de concreto, tornando as estruturas mais leves e diminuindo o custo de construção (POSI et al., 2013a). Dargahi-Zaboli e Alizadeh (2014) destacam que, além de reduzir o peso da estrutura, esses blocos possuem outras vantagens, como resistência ao fogo e maior resistência contra intempéries (como o clima frio).

Há anos, os concretos leves têm sido investigados, principalmente para utilização em paredes de alvenaria, pois apresentam elevada resistência à proporção de peso, baixo coeficiente de condutibilidade térmica e boa característica de isolamento de som. Podem ser produzidos a partir de agregados leves, como argila expandida, xisto expandido e cinzas volantes (POSI et al., 2013b). Basicamente, os materiais utilizados para sua fabricação são: aglomerantes (usualmente, cimento Portland), agregados graúdos e miúdos e água. Dependendo de requisitos específicos, podem-se utilizar aditivos e pigmentos.

Os equipamentos utilizados para sua produção são chamados vibroprensas, devido ao mecanismo empregado para fazer com que o material penetre e preencha

os moldes (MEDEIROS; SABBATINI, 1993). Segundo Sousa (2001), o responsável pelo preenchimento e adensamento da mistura é o sistema de vibração e o mecanismo responsável pelo adensamento e controle da altura dos blocos é o sistema de compressão. Nesse processo, a sequência de colocação dos materiais e o tempo adequado de mistura devem ser observados, de maneira a ser compatíveis com a produtividade do equipamento. Ainda, para garantir que o produto final obtenha o grau de compactação necessário, devem-se respeitar os tempos de alimentação e vibração (MEDEIROS; SABBATINI, 1993).

Após a moldagem, os blocos são transportados até o local de cura, sendo esta um conjunto de medidas que visam a proporcionar aos blocos as condições de umidade, temperatura e pressão necessárias a uma adequada reação de hidratação do cimento, uma vez que as condições de umidade e temperatura, principalmente nos primeiros dias, têm muita importância nas propriedades do concreto endurecido (TANGO, 1984).

8.2.1 Objetivo

O objetivo desta etapa dos estudos foi de desenvolver blocos vazados de concreto simples utilizando resíduos de madeira de *Pinus* spp e cimento, com diferentes traços; verificar a sua resistência à compressão axial, densidade, desempenho térmico e comparar os custos dos blocos produzidos.

8.3 MATERIAIS E MÉTODOS

Foram utilizados cavacos de *Pinus* spp, procedentes de uma madeireira localizada no município de Tunas do Paraná, obtidos por meio de ações mecânicas de descascadores e picadores, comercializados como biomassa.

8.3.1 Preparação das partículas

Os cavacos secos foram processados em um moinho de martelos utilizando-se uma peneira de 1" (2,54 cm) na saída da ação de moagem, limitando, assim, o tamanho máximo dos cavacos produzidos. Após a moagem, o material foi peneirado e somente o material passante na peneira de 4,75 mm e retido na de 2,36 mm foi

utilizado nesta etapa da pesquisa. Conforme detalhamento metodológico apresentado no capítulo 3.

8.3.2 Aglomerantes

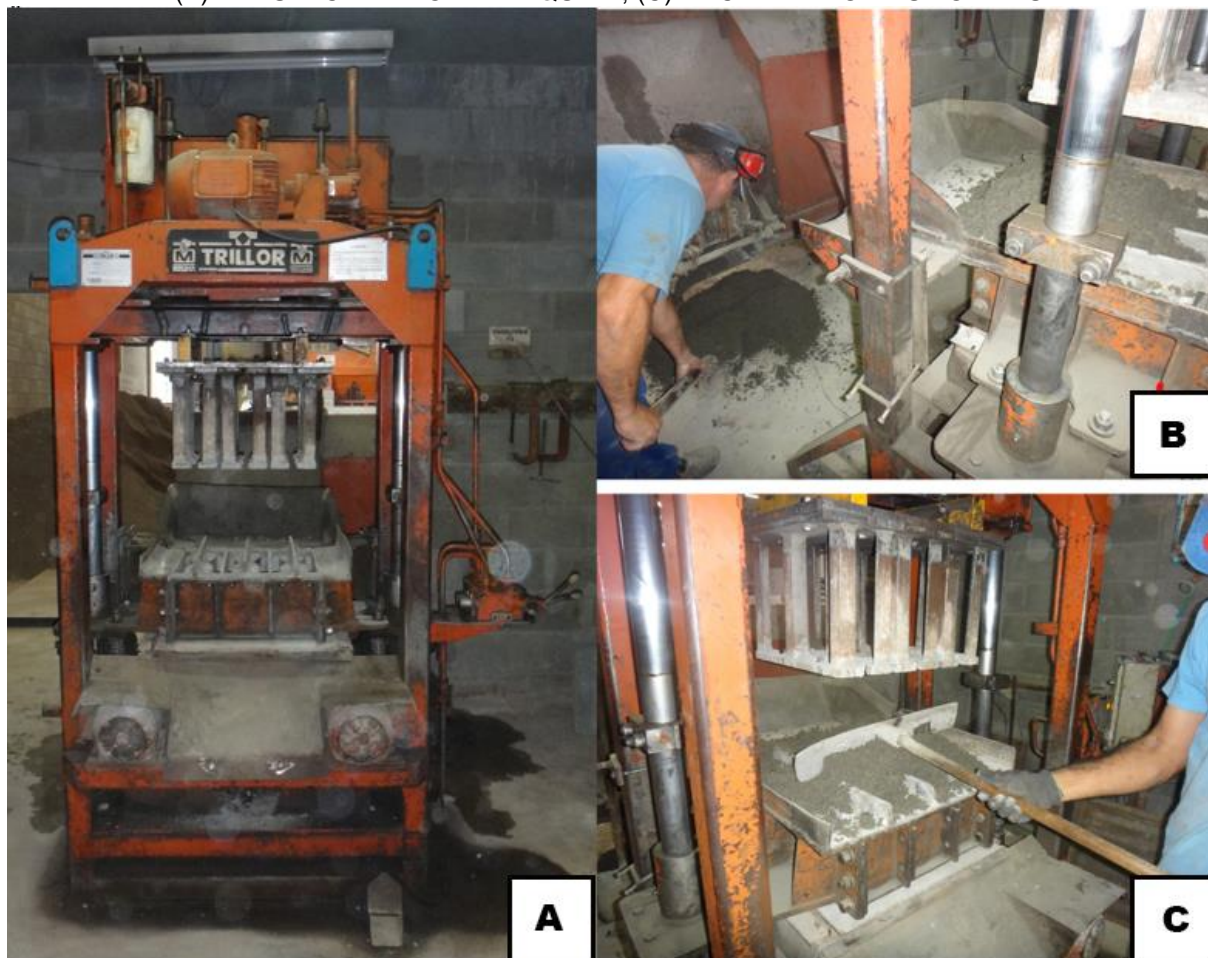
Para a produção dos blocos foram utilizados dois tipos de cimentos Portland: CP II-Z e CP V-ARI. Também foi utilizado aglomerante aéreo para o pré-tratamento das partículas, preparado por meio de suspensão de CaO e água.

8.3.3 Equipamentos

O equipamento utilizado para mistura dos materiais foi um misturador com tambor fixo e eixo horizontal, capacidade de 200 litros (seco) e tempo de mistura de 120 a 150 segundos, modelo MR-200, da marca Trillor Montana. Para a produção dos blocos, foi utilizada uma vibroprensa da marca Trillor Montana, modelo MBX 200, da empresa Bricka Sistemas Construtivos Ltda., localizada no município de Piraquara. Esse equipamento aplica uma carga unidirecional vertical de 1.010 kgf, distribuída durante à compressão do concreto em estado fresco para produção de três blocos de cada vez, tendo capacidade de produzir até 3.600 blocos por dia. Foi acoplado a ele o molde para produção de três blocos de concreto de 140 x 190 x 390 mm (largura x altura x comprimento).

Essa máquina é considerada simplificada, de baixo custo e de grande praticidade. Não possui silo para o concreto, nem gaveta alimentadora, sendo o enchimento da forma manual, a partir de mesa posicionada na parte traseira da máquina, que também é abastecida manualmente (FIGURA 39).

FIGURA 39 – ENCHIMENTO MANUAL DA VIBROPRENSA: (A) VIBROPRENSA MODELO MBX 200; (B) ABASTECIMENTO DA MÁQUINA; (C) ENCHIMENTO DAS FORMAS



FONTE: A autora (2016).

8.3.4 Fabricação dos blocos

Para produção dos blocos, foi preparada a suspensão de Ca(OH)_2 para ser utilizada como pré-tratamento das partículas de madeira, por meio da mistura de CaO e água, na relação de 1:6,25, respectivamente, tendo a cal, grau de pureza de 80% (valor informado pelo fabricante).

O cimento Portland tipo CP II-Z foi utilizado para produção de blocos com a relação madeira cimento 1:1,5 e 1:2,2. O cimento Portland CP-V ARI foi utilizado somente para produção de blocos com relação madeira:cimento de 1:2,2.

O plano experimental consistiu do estudo de três tratamentos, com nove blocos cada, totalizando 27 blocos, dos quais 18 foram produzidos com cimento Portland tipo CP-II Z e os nove restantes com cimento Portland tipo CP-V. A princípio este cimento não seria utilizado, por não ter sido estudado nas fases anteriores do trabalho, mas

como era o cimento utilizado na fábrica onde os blocos foram produzidos, o mesmo entrou no delineamento experimental conforme apresentado no QUADRO 16 a seguir:

QUADRO 16 – DELINEAMENTO EXPERIMENTAL

| Tratamento | Cimento Portland | Relação madeira:cimento |
|------------|------------------|-------------------------|
| A | CP-II Z | 1:1,5 |
| B | CP-II Z | 1:2,2 |
| C | CP V ARI | 1:2,2 |

FONTE: A autora (2016).

A quantidade de materiais para a produção dos blocos encontra-se no QUADRO 17.

QUADRO 17 – MATERIAIS UTILIZADOS PARA A PRODUÇÃO DOS BLOCOS

| Material | Tipo A | Tipo B | Tipo C |
|--------------------------------|---------|---------|---------|
| Cimento | 1.945 g | 2.264 g | 2.264 g |
| Cavacos de <i>Pinus</i> | 1.491 g | 1.184 g | 1.184 g |
| Água 30% | 583,5 g | 679,2 g | 679,2 g |
| Suspensão de Ca(OH)_2 | 1.491 g | 1.184 g | 1.184 g |

FONTE: A autora (2016).

A mistura dos materiais foi feita em um misturador forçado. A ordem da mistura foi realizada conforme segue: com as partículas de madeira no misturador, acrescentou-se a suspensão de Ca(OH)_2 , sendo a mistura feita por um período de dez minutos; depois, colocou-se o cimento; após a mistura dos três materiais, a água foi adicionada aos poucos para que a consistência fosse observada pelo operador da vibroprensa; com 67% da quantidade de água planejada a mistura possuía consistência adequada para entrar na vibroprensa. Por esta razão, a quantidade de água da tabela acima não foi utilizada. Este valor não é o total de água da mistura, pois a suspensão de Ca(OH)_2 possui 77,6% de solução de água e hidróxido de cálcio, onde parte desta vai para dentro das partículas. As sequências do procedimento de mistura estão apresentadas nas fotos da FIGURA 40 a seguir:

FIGURA 40 – SEQUÊNCIA DA MISTURA DOS MATERIAIS PARA PRODUÇÃO DOS BLOCOS: (A) PARTÍCULAS DE MADEIRA INSERIDAS NO MISTURADOR; (B) ADIÇÃO DA SUSPENSÃO DE Ca(OH)_2 ; (C) ADIÇÃO DO CIMENTO PORTLAND; (D) MISTURA DOS TRÊS MATERIAIS; (E) ADIÇÃO DE ÁGUA; (F) MISTURA PRONTA PARA PRODUÇÃO DOS BLOCOS



FONTE: A autora (2016).

Após a mistura dos materiais, a vibroprensa foi abastecida com a quantidade adequada para confecção de três blocos. O abastecimento das formas foi feito em três camadas iguais, cada uma foi vibrada por 15 segundos, totalizando 45 segundos no processo. Após o enchimento das formas, as sapatas da vibroprensa foram descidas para compactação e vibração final das peças. O tempo de vibrocompressão, alcançado quando a peça atinge a altura desejada, também foi de 15 segundos.

Ao término da vibroprensagem, os blocos frescos formados foram retirados manualmente da máquina, reiniciando-se o ciclo. Após a retirada dos blocos da máquina, os mesmos foram para cura, que se deu ao ar, em ambiente coberto e protegido da insolação direta.

A sequência dos procedimentos de produção dos blocos está apresentada nas fotos da FIGURA 41 a seguir:

FIGURA 41 – SEQUÊNCIA DA PRODUÇÃO DOS BLOCOS NA VIBROPRENSA: (A) RETIRADA DO MATERIAL DO MISTURADOR, PASSANDO PARA A VIBROPRENSA; (B) MATERIAL SENDO VIBRADO E ESPALHADO DENTRO DAS FORMAS; (C) MATERIAL SENDO COMPACTADO PELAS SAPATAS; (D) LEVANTAMENTO DAS FORMAS; (E) BLOCOS SENDO RETIRADOS DA MÁQUINA; (F) BLOCOS ESPERANDO A CURA



FONTE: A autora (2016).

8.3.4.1 Alteração de produção dos blocos B e C

Após a produção dos nove primeiros blocos, verificou-se que, ao saírem da vibroprensa, os blocos sofriam um leve aumento de altura, devido à recuperação elástica das partículas de madeira. Diante desse fato, optou-se por diminuir sua altura final, para que, ao saírem da máquina, os blocos atingissem 190 mm. A FIGURA 42 mostra os blocos produzidos na segunda fase.

FIGURA 42 – BLOCOS PRODUZIDOS COM TRAÇO DE 1:2,2 E CIMENTO PORTLAND CP II-Z



FONTE: A autora (2016).

Com os 27 blocos produzidos, os mesmos fizeram sua cura ao ar, em ambiente coberto e protegido da insolação direta. Destes 27 blocos, nove foram utilizados para determinar as propriedades físicas dos blocos (massa específica, teor de umidade, absorção de água e área líquida), nove blocos para determinar as resistências à compressão axial e três blocos para determinar as características térmicas.

8.3.5 Determinação das propriedades físicas e mecânicas

Em conformidade com a norma específica para blocos vazados de concreto NBR 6136 (ABNT, 2014b) devem ser executados os seguintes ensaios:

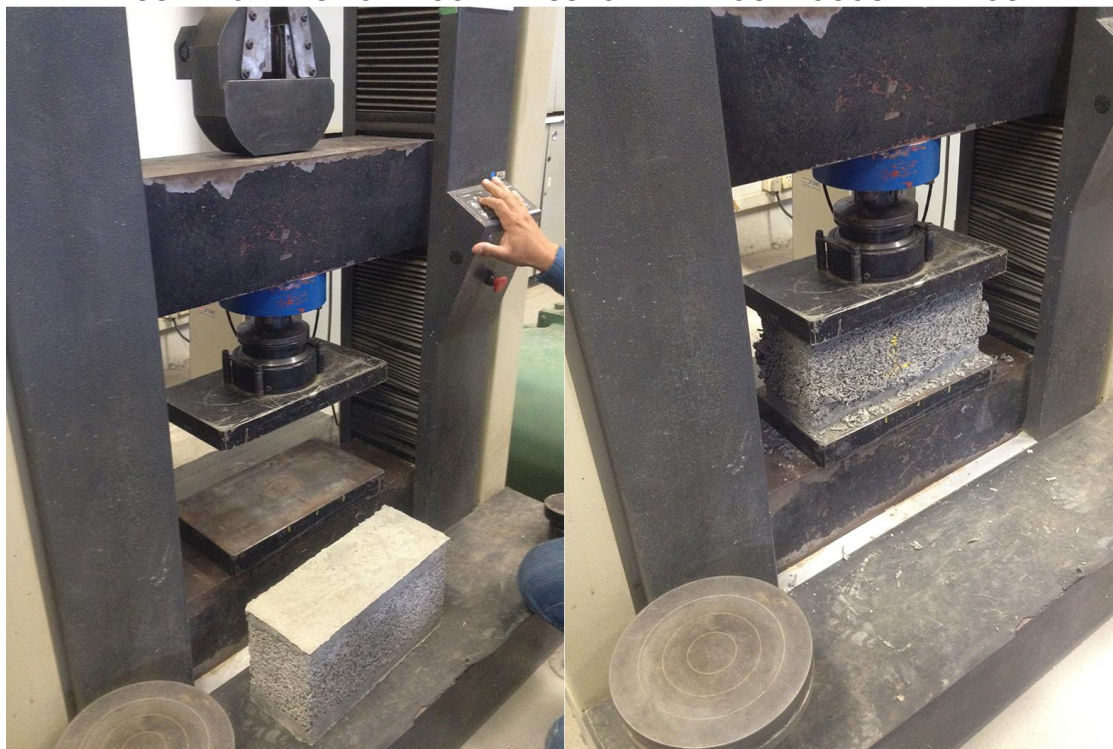
- resistência à compressão axial;
- análise dimensional, absorção e área líquida;
- retração linear por secagem.

Por sua vez, segundo a NBR 6136 (ABNT, 2014b), o ensaio de retração é facultativo, podendo ser solicitado pelo comprador.

8.3.5.1 Ensaio de resistência à compressão axial

Após o período de cura na fábrica, foram encaminhados três blocos de cada tratamento para determinação da resistência à compressão axial no LAME, onde suas dimensões foram tomadas, conforme determinado pela NBR 12118 (ABNT, 2014c). No laboratório, os blocos tiveram suas faces regularizadas com argamassa, com espessura máxima de 3 mm e na sequência, colocados em máquina de ensaios da marca Emic, modelo PC 200, com dispositivos para ensaio de blocos de concreto e tomada de dados por computador (FIGURA 43), sendo aplicada uma carga na mesma direção do esforço que eles devem suportar durante seu emprego.

FIGURA 43 – ENSAIO DE COMPRESSÃO AXIAL DOS BLOCOS VAZADOS



FONTE: A autora (2016).

Os resultados da resistência à compressão axial foram obtidos dividindo-se a carga máxima na máquina pela média das áreas das duas faces de trabalho, sem desconto das áreas dos furos e das reentrâncias, conforme exige a norma NBR 6136 (ABNT, 2014b).

8.3.5.2 Ensaio de absorção de água, teor de umidade e área líquida

Após o período de 28 dias, os blocos foram transportados da fábrica Bricka para o Laboratório de Painéis da UFPR, onde foram identificados, pesados e medidos com sensibilidade de 0,5 mm. O valor médio de cada dimensão dos blocos foi efetuado com três determinações executadas em pontos diferentes.

Para determinação da massa seca, três blocos de cada tratamento foram identificados e colocados em estufa a $110 (\pm 5) ^\circ\text{C}$ por um período de 24 horas, contado a partir do início da elevação da temperatura. Após esse período, os blocos foram novamente pesados e voltaram para a estufa por um período de duas horas. A operação foi repetida até que, em duas pesagens sucessivas, não se registrou para os blocos diferença de massa superior a 0,5% em relação ao maior valor.

Após resfriados naturalmente à temperatura ambiente, os blocos foram imersos em água à temperatura de $23 (\pm 5) ^\circ\text{C}$ por um período de 24 horas, depois do qual foram pesados na condição saturada com a superfície seca, anotando-se os valores encontrados. A operação foi repetida a cada duas horas até que, em duas pesagens sucessivas, não foram registradas diferenças superiores a 0,5% em relação ao maior valor, obtendo-se, dessa forma, a massa saturada dos blocos.

Depois de saturados, conforme procedimento descrito anteriormente, determinaram-se as massas com os blocos imersos em água à temperatura de $23 (\pm 5) ^\circ\text{C}$, por meio de balança hidrostática; o valor encontrado denominou-se massa aparente.

Para o cálculo da porcentagem de umidade de cada bloco, no momento da entrega no laboratório, foi utilizada a EQUAÇÃO 08:

$$u \% = \frac{m_3 - m_1}{m_2 - m_1} \times 100 \quad (\text{EQUAÇÃO 08})$$

Em que:

- $u\%$: umidade do bloco no momento da entrega no laboratório (%);
- m_1 : massa do bloco seco (kg);
- m_2 : massa saturada do bloco (kg);
- m_3 : massa do bloco no momento da entrega no laboratório (kg).

O valor da absorção de água, expresso em porcentagem, foi calculado pela EQUAÇÃO 09:

$$a\% = \frac{m_2 - m_1}{m_1} \times 100 \quad (\text{EQUAÇÃO 09})$$

Em que:

- a%: absorção de água (%);
- m₁: massa do bloco seco (kg);
- m₂: massa saturada do bloco (kg).

Por fim, para o cálculo da área líquida, foi utilizada a EQUAÇÃO 10:

$$Aliq = \frac{m_2 - m_4}{h * \gamma * 1000} \quad (\text{EQUAÇÃO 10})$$

Em que:

- Aliq: área líquida (cm²);
- m₂: massa saturada do bloco (kg);
- m₄: massa aparente do bloco (kg);
- h: altura do bloco, medida na direção perpendicular à seção de trabalho (cm);
- γ: massa específica da água utilizada no ensaio (g/m³).

8.3.5.3 Determinação da condutividade térmica dos blocos

Para determinação da condutividade térmica dos blocos, foram retirados das paredes dos blocos quatro prismas de 100 x 100 mm, mediante corte a seco, os quais foram lixados, de forma a favorecer a leitura no condutivímetro, conforme apresentado na FIGURA 44.

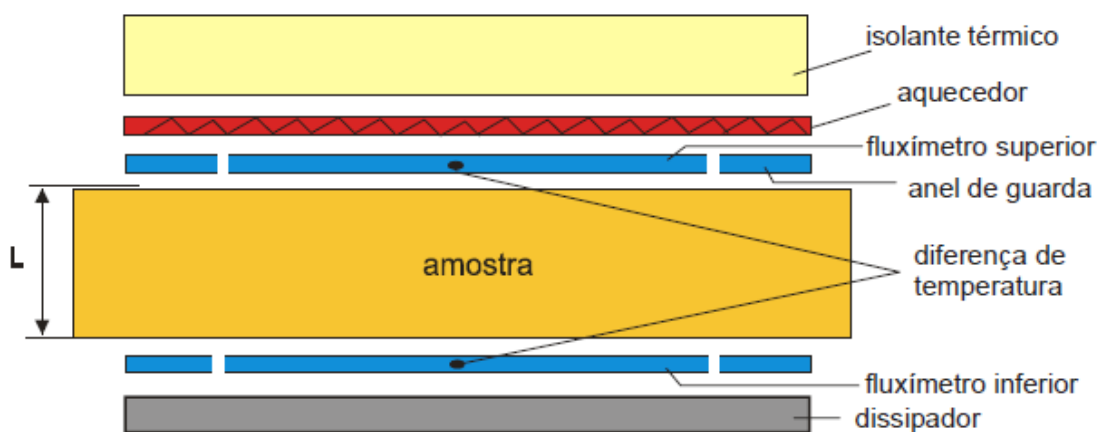
FIGURA 44 – PREPARAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA PARA ENSAIO DE CONDUTIVIDADE TÉRMICA



FONTE: A autora (2016).

Os ensaios para a determinação da condutividade térmica foram realizados no Centro Brasileiro de Eficiência Energética em Edificações (CB3E), na Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), com base na ASTM C-518, por meio do equipamento denominado condutímetro fluximétrico (FIGURA 45).

FIGURA 45 – ESQUEMA DO FLUXÍMETRO TIPO PLACA QUENTE PROTEGIDA



FONTE: Centro Brasileiro de Eficiência Energética em Edificações (CB3E) (2014)

O dispositivo experimental utilizado no ensaio foi composto por um sistema de aquisição de dados, conectado a um microcomputador, que monitorou o fluxo de calor e as temperaturas durante o ensaio. O sistema de aquisição de dados recebeu informações dos fluxímetros superior e inferior e do termopar, a cada leitura programada. O calor foi fornecido para a amostra por meio de uma resistência aquecedora, alimentada por uma fonte de corrente contínua. O dissipador foi ligado a

um dispositivo de banho termostatzado, sendo responsável por manter a temperatura constante, na faixa dos 25°C. O resultado do ensaio foi obtido ao se atingir o regime permanente, a partir do qual a curva convergiu para um valor específico em ambos os fluxímetros, evidenciando o valor da condutividade térmica.

A resistência térmica foi determinada a partir da lei de Fourier (EQUAÇÃO 11):

$$R = \frac{t_1 - t_2}{\frac{q}{A}} \quad (\text{EQUAÇÃO 11})$$

Em que:

- R: resistência térmica (m²K/W);
- q: fluxo de calor médio medido pelos fluxímetros 1 e 2 (W);
- t1 e t2: temperaturas médias nas superfícies das amostras.

Por fim, considerando a amostra homogênea, foi possível determinar a condutividade térmica do material (EQUAÇÃO 12):

$$\lambda = \frac{L}{R} \quad (\text{EQUAÇÃO 12})$$

Em que:

- λ : condutividade térmica (W/mK);
- L: espessura da amostra (m).

8.3.6 Análise estatística

As análises foram realizadas por meio do *software* Statgraphics Centurion XV, versão 15.2.11, utilizando-se o método da análise da variância e, como procedimento para comparação de médias, o Tukey-Kramer.

8.3.7 Determinação do custo dos blocos

Para o cálculo do custo dos blocos, foram considerados, além do custo de produção, todos os processos anteriores para a produção dos cavacos, como secagem das partículas de madeira, moagem e peneiramento.

Além disso, foram apontadas todas as perdas de cavaco, até sua utilização na produção dos blocos. Para o custo de produção dos blocos, foram considerados a produtividade, os materiais e a mão de obra fornecidos pela empresa Bricka Sistemas Construtivos Ltda., onde os blocos foram produzidos.

8.4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

8.4.1 Propriedades físicas

Na TABELA 25, são apresentados os valores de densidade, teor de umidade, absorção de água e área líquida dos blocos.

TABELA 25 – ABSORÇÃO DE ÁGUA, TEOR DE UMIDADE E ÁREA LÍQUIDA DOS BLOCOS

| Bloco | Densidade (kg/m ³) | Umidade (%) | Absorção (%) | Área líquida (cm ²) |
|-------|--------------------------------|-------------|--------------|---------------------------------|
| A | 594,71 | 32,15 | 49,81 | 235,84 |
| | 618,33 | 30,84 | 47,46 | 236,18 |
| | 628,79 | 31,29 | 47,45 | 239,34 |
| B | 721,90 | 32,85 | 42,74 | 233,81 |
| | 709,21 | 34,86 | 42,40 | 226,67 |
| | 696,95 | 34,14 | 43,42 | 229,64 |
| C | 730,80 | 35,55 | 35,91 | 220,37 |
| | 703,52 | 34,51 | 35,77 | 217,85 |
| | 704,12 | 34,89 | 36,97 | 216,36 |

FONTE: A autora (2016).

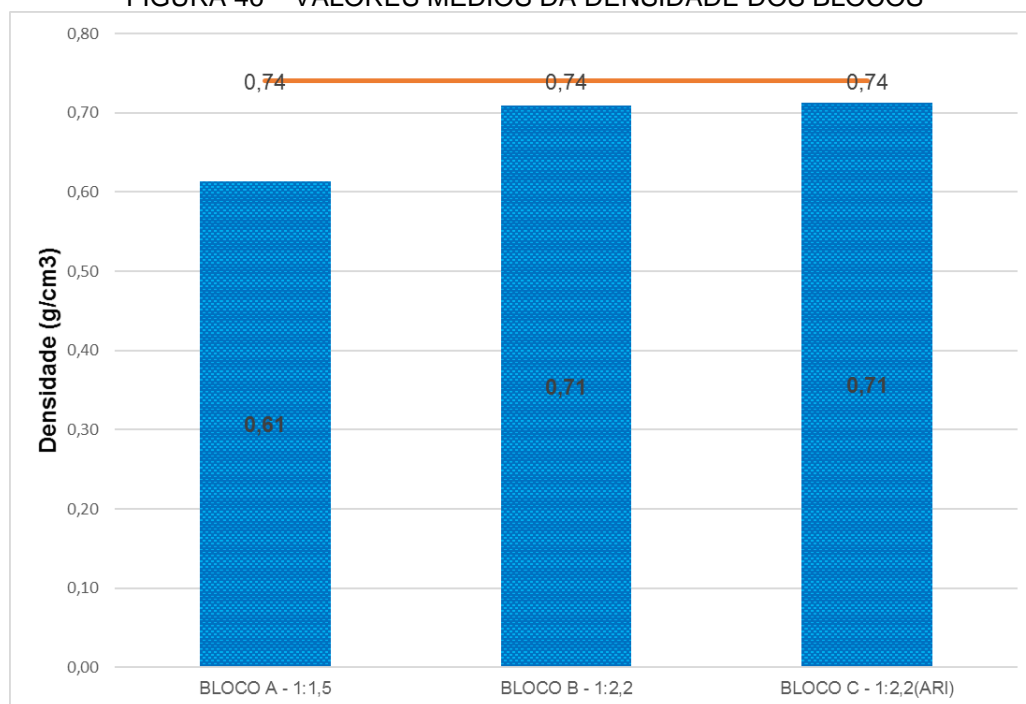
LEGENDA: BLOCO A: Traço madeira:cimento igual a 1:1,5, cimento CP-II.Z

BLOCO B: Traço madeira:cimento igual a 1:2,2, cimento CP-II Z

BLOCO C: Traço madeira:cimento igual a 1:2,2, cimento CP-V ARI

A FIGURA 46 mostra os valores médios encontrados para a densidade dos blocos.

FIGURA 46 – VALORES MÉDIOS DA DENSIDADE DOS BLOCOS



FONTE: A autora (2016).

Os valores encontrados foram comparados com aqueles citados por Parchen (2012), em cujos estudos os compósitos de madeira-cimento apresentaram valores de densidade entre 0,60 e 0,74 g/cm³. Todos os blocos ficaram com densidade abaixo da mencionada pelo autor. Estas densidades correspondem à classificação dos blocos leves de concreto, de acordo com a NBR 12655 (ABNT, 2015), tendo ocorrido um aumento na densidade com o acréscimo de cimento na mistura – aproximadamente 16,3% entre a média dos blocos de 1:1,5 e a média dos blocos de 1:2,2 (CP V-ARI).

Com relação às outras propriedades físicas, a TABELA 26 apresenta os valores médios de absorção de água e umidade para os blocos vazados produzidos.

TABELA 26 – VALORES MÉDIOS DE ABSORÇÃO DE ÁGUA E TEOR DE UMIDADE DOS BLOCOS VAZADOS

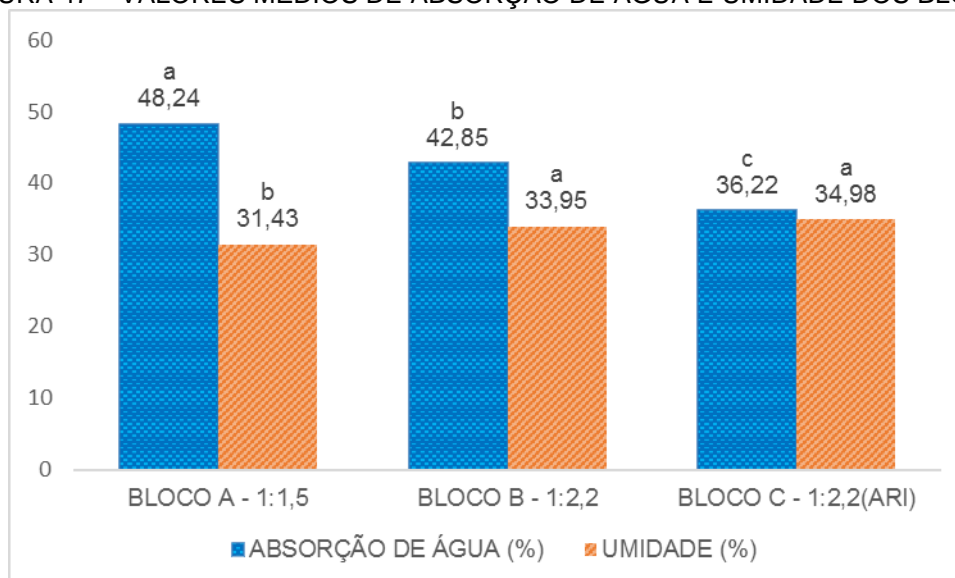
| Bloco | Absorção de água (%) | Umidade (%) |
|-------|----------------------------|----------------------------|
| A | 48,24 ^a (4,00%) | 31,43 ^b (2,12%) |
| B | 42,85 ^b (8,37%) | 33,94 ^a (3,00%) |
| C | 36,22 ^c (5,60%) | 34,98 ^a (1,50%) |

FONTE: A autora (2016).

NOTA: Médias seguidas pelas mesmas letras nas colunas não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. Valores entre parênteses indicam o coeficiente de variação.

Na FIGURA 47, os mesmos valores são apresentados, destacando-se que colunas da mesma cor acompanhadas de letras iguais representam semelhança estatística apontada pelo teste de Tukey.

FIGURA 47 – VALORES MÉDIOS DE ABSORÇÃO DE ÁGUA E UMIDADE DOS BLOCOS



FONTE: A autora (2016).

Com relação à absorção de água determinada para os blocos, observa-se que os três tratamentos diferem entre si, tendo os blocos tipo C (produzidos com CP V-ARI) apresentado o menor valor. Uma possível explicação para altos valores de absorção pode ser atribuída à baixa quantidade de cimento, não havendo a total encapsulação das partículas de madeira. Outra explicação seria o tamanho das partículas, que não conseguem preencher todos os espaços da forma, sobrando vários vazios, que acabam ajudando na penetração da água. A esse respeito, Parchen (2012) afirma que os valores de absorção em compósitos de madeira-cimento expressam, além da água absorvida pelas partículas de madeira, a água retida nos vazios entre elas. Altos valores de absorção de água indicam que blocos somente podem ser utilizados para fechamento interno, característica que é estudada neste capítulo.

Em relação à umidade, os blocos fabricados com relação de 1:2,2 são estatisticamente semelhantes e diferem daqueles produzidos com relação de 1:1,5. Stancato (2006) observou uma diferença significativa entre os valores de absorção e umidade dos blocos moldados em fábrica e em laboratório, evidenciando a importância do procedimento de cura controlado, ocorrido em laboratório.

8.4.2 Propriedades mecânicas

Os resultados dos ensaios de compressão axial para os três tipos de blocos estão apresentados na TABELA 27.

TABELA 27 – RESULTADOS DOS ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL AOS 28 DIAS DE CURA DOS BLOCOS

| Bloco | Comprim. (cm) | Largura (cm) | Altura (cm) | Área (cm ²) | Densid. (g/cm ³) | Força (kgf) | Resistência à Compressão Axial (MPa) |
|-------|---------------|--------------|-------------|-------------------------|------------------------------|-------------|--------------------------------------|
| A | 39,30 | 14,80 | 20,4 | 581,64 | 0,54 | 6.464 | 1,11 |
| | 39,30 | 14,40 | 20,6 | 565,92 | 0,56 | 6.373 | 1,13 |
| | 39,30 | 15,00 | 21,0 | 589,50 | 0,52 | 6.148 | 1,04 |
| B | 39,25 | 14,00 | 19,67 | 549,50 | 0,71 | 6.518 | 1,19 |
| | 39,02 | 14,02 | 19,12 | 547,06 | 0,72 | 6.926 | 1,27 |
| | 39,00 | 14,00 | 19,40 | 546,00 | 0,74 | 7.384 | 1,35 |
| C | 39,19 | 14,21 | 19,50 | 556,89 | 0,72 | 8.791 | 1,58 |
| | 39,35 | 14,16 | 19,30 | 557,20 | 0,66 | 7.302 | 1,31 |
| | 39,22 | 14,14 | 19,20 | 554,57 | 0,70 | 7.609 | 1,37 |

FONTE: A autora (2016).

NOTA: BLOCO A – 1:1,5 (madeira:cimento)

BLOCO B 1:2,2 (madeira:cimento)

BLOCO C 1:2,2 (ARI) (madeira:cimento)

A TABELA 28 apresenta os valores médios obtidos para as propriedades de densidade e resistência à compressão axial.

TABELA 28 – VALORES MÉDIOS DE DENSIDADE E RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL AOS 28 DIAS DE CURA DOS BLOCOS

| Bloco | Densidade (g/cm ³) | Resistência à Compressão Axial (MPa) |
|-------|--------------------------------|--------------------------------------|
| A | 0,54 ^b (3,7%) | 1,09 ^b (4,1%) |
| B | 0,72 ^a (2,1%) | 1,26 ^{ba} (6,6%) |
| C | 0,69 ^a (4,4%) | 1,42 ^a (9,9%) |

FONTE: A autora (2016).

NOTA: Médias seguidas pelas mesmas letras nas colunas não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. Valores entre parênteses indicam o coeficiente de variação.

NOTA 2: BLOCO A – 1:1,5 , BLOCO B 1:2,2 , BLOCO C 1:2,2 (ARI)

Os blocos produzidos com traço de 1:1,5, como esperado, apresentaram valor médio de densidade estatisticamente mais baixos que os blocos produzidos com o traço 1:2,2, devido a quantidade de cimento utilizado na mistura.

Os blocos produzidos com o traço de 1:2,2 (tipo B e C) apresentaram valor médio de resistência à compressão axial de 1,42 MPa (tipo C) e 1,26 MPa (tipo B) sendo os valores estatisticamente iguais.

Entre os blocos produzidos com cimento do tipo Portland CP-II Z (tipo A e B) os valores médios de resistência à compressão axial também se apresentaram estatisticamente iguais.

Os blocos produzidos com traço de 1:2,2 e cimento Portland CP V-ARI (tipo C) apresentaram valor médio de resistência à compressão axial superior aos blocos produzidos com traço 1:1,5 utilizando cimento Portland CP II-Z (tipo A).

Estes resultados estão próximos aos encontrados nos blocos moldados em fábrica por Stancato (2006). Nos estudos desse autor nos blocos moldados e curados em fábrica utilizando *Pinus caribea*, os valores de resistência à compressão axial variaram de 1,43 a 1,72 MPa. Segundo ele, estes valores podem estar associados ao tipo de cura realizado na fábrica de blocos que foi cura ao ar com molhamento duas vezes por dia; já em seus estudos em laboratório os valores variaram de 1,72 a 2,10 MPa. Sendo que nos estudos de Stancato (2006) foi utilizado cimento, areia, pó de pedra e resíduos vegetais na proporção 1:1,5:3:0,36 indicando que a utilização de areia e pó de pedra podem aumentar os valores de resistência à compressão axial.

Devido ao fato de os blocos apresentarem valor de resistência abaixo de 3 Mpa que é o limite mínimo, conforme a NBR 6136 (ABNT, 2014b), decidiu-se por fazer uma simulação desses valores para blocos maciços. Para tanto, a força apresentada pela máquina de ensaio foi dividida pela área líquida do bloco. Os resultados podem ser observados na TABELA 29.

TABELA 29 – VALORES DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL PARA BLOCOS MACIÇOS (UTILIZANDO A ÁREA LÍQUIDA)

| Bloco | Comprim. (cm) | Largura (cm) | Altura (cm) | Área líquida (cm ²) | Densid. (g/cm ³) | Força (kgf) | Resistência à compressão (MPa) |
|-------|---------------|--------------|-------------|---------------------------------|------------------------------|-------------|--------------------------------|
| A | 39,30 | 14,80 | 20,4 | 370,80 | 0,54 | 6.464 | 1,74 |
| | 39,30 | 14,40 | 20,6 | 355,08 | 0,56 | 6.373 | 1,79 |
| | 39,30 | 15,00 | 21,0 | 378,66 | 0,52 | 6.148 | 1,62 |
| B | 39,25 | 14,00 | 19,67 | 338,66 | 0,71 | 6.518 | 1,92 |
| | 39,02 | 14,02 | 19,12 | 336,22 | 0,72 | 6.926 | 2,06 |
| | 39,00 | 14,00 | 19,40 | 335,16 | 0,74 | 7.384 | 2,20 |
| C | 39,19 | 14,21 | 19,50 | 346,05 | 0,72 | 8.791 | 2,54 |
| | 39,35 | 14,16 | 19,30 | 346,36 | 0,66 | 7.302 | 2,11 |
| | 39,22 | 14,14 | 19,20 | 343,73 | 0,70 | 7.609 | 2,21 |

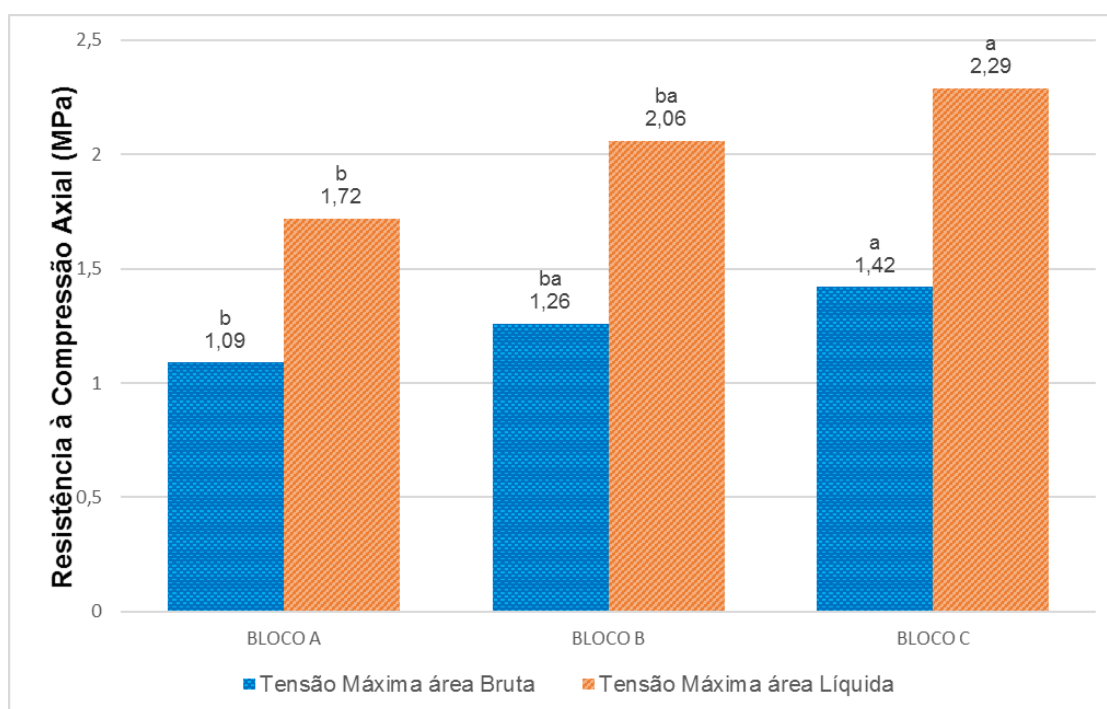
Fonte: A autora (2016).

NOTA: BLOCO A – 1:1,5 , BLOCO B 1:2,2 , BLOCO C 1:2,2 (ARI)

Na FIGURA 48 são apresentados os valores médios da resistência à compressão axial dos blocos, calculados pelas áreas bruta e líquida.

Conforme a norma de blocos cerâmicos para alvenaria de vedação NBR 15270-1 (ABNT, 2015) um bloco para vedação deve ter a resistência de compressão axial $\geq 1,5$ MPa. Enquanto a norma de blocos de concreto celular autoclavado NBR 13440 (ABNT, 2013) exige uma resistência à compressão axial $\geq 1,2$ MPa para blocos classe C12.

FIGURA 48 – VALORES MÉDIOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL PARA ÁREAS BRUTA E LÍQUIDA DOS BLOCOS



FONTE: A autora (2016).

Comparando os valores de resistência à compressão axial utilizando as áreas bruta e líquida, observa-se um acréscimo médio de 60%. Assim, estima-se que, se os blocos fossem produzidos com as mesmas partículas e traços em formas sem a parte vazada, isto é, maciços, poderiam ser obtidos esses valores apresentados no gráfico para a resistência à compressão axial. Porém cabe-se observar que seria necessário maior consumo de materiais.

Os blocos tipo A, B e tipo C, atendem as normas NBR 15270-1 (ABNT, 2015) e a norma NBR 13440 (ABNT, 2013) quando utilizada a área líquida dos blocos. Quando utilizado a área bruta, os blocos tipo B e C atendem a NBR 13440 (ABNT, 2013) de blocos celulares.

8.4.3 Propriedades térmicas

Os valores médios de condutividade térmica das paredes dos blocos produzidos estão apresentados na TABELA 30. Como se pode observar, a condutividade térmica eleva-se com o aumento de cimento na mistura. No entanto, todos os resultados apresentaram valor de isolamento térmico superior ao dos materiais cimentícios convencionais, conforme se pode observar na TABELA 31.

TABELA 30 – VALORES MÉDIOS DE CONDUTIVIDADE DAS PAREDES DOS BLOCOS

| Bloco | Espessura da amostra (mm) | Condutividade térmica (W/mK) | Resistência térmica (m ² K/W) |
|-------|---------------------------|------------------------------|------------------------------------------|
| A | 25,0 | 0,190 | 0,132 |
| B | 28,0 | 0,217 | 0,129 |
| C | 26,6 | 0,234 | 0,114 |

FONTE: A autora (2016).

A TABELA 31 contém os valores da densidade e da condutividade térmica de alguns materiais, conforme a NBR 15220 (ABNT, 2008a).

TABELA 31 – VALORES DE DENSIDADE E CONDUTIVIDADE TÉRMICA DE ALGUNS MATERIAIS DA CONSTRUÇÃO CIVIL

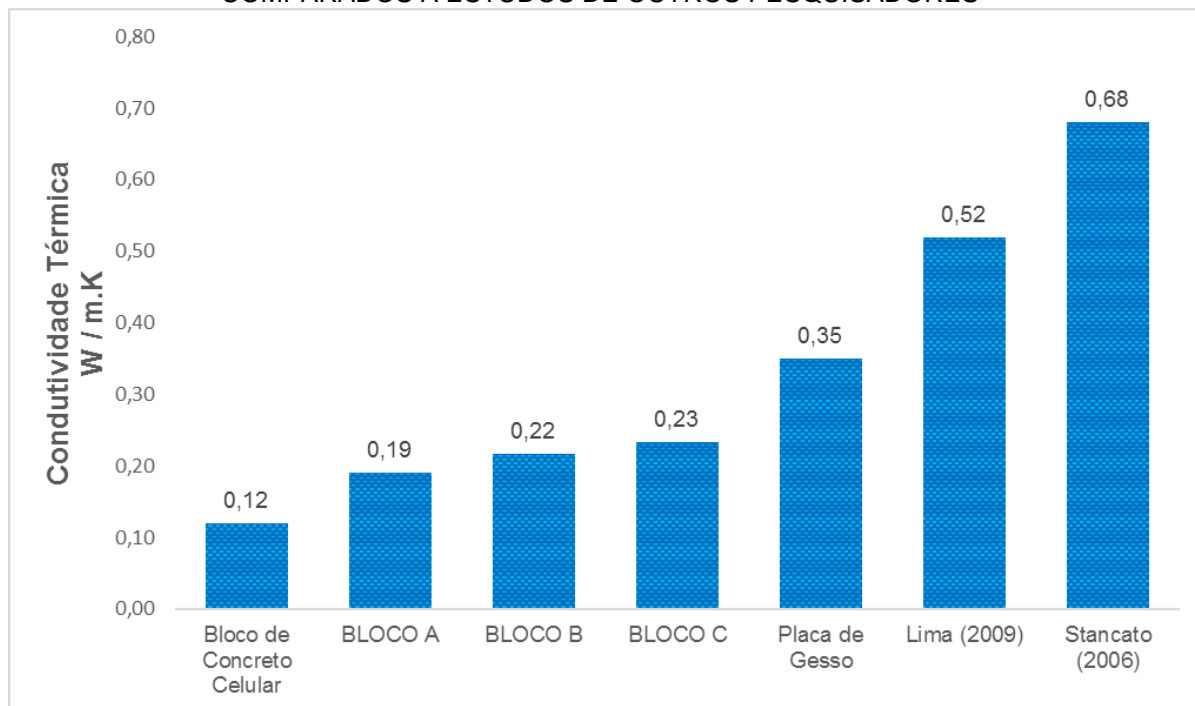
| Material | Densidade (kg/m ³) | Condutividade térmica (W/mK) |
|-----------------------------------------|--------------------------------|------------------------------|
| Concreto normal | 2.200-2.400 | 1,75 |
| Concreto pozolânico | 1.000-1.200 | 0,35 |
| Placa de gesso | 750-1.000 | 0,35 |
| Placa de compensado | 450-550 | 0,35 |
| Madeira (<i>Pinus</i> , cedro e pinho) | 600-750 | 0,23 |
| Bloco de concreto celular | 300-1800 | 0,12 |

FONTE: Adaptado de ABNT (2008a).

Como se pode observar, os materiais vegetais possuem maior resistividade à condução de calor e, quando incorporados à matriz cimentícia, transmitem, de modo direto, essas mesmas características ao compósito formado.

A condutividade térmica dos blocos tipo A foi a mais baixa (0,19 W/mK), ficando abaixo do valor da madeira de *Pinus* (0,23 W/mK), seguida pelos blocos tipo B (0,22W/mK) e blocos tipo C (0,23 W/mk). Comparado a estudos de outros pesquisadores, esse valor apresenta característica de isolamento térmico superior à encontrada por Lima (2009), cujos blocos com CCA possuíam valores médios de condutividade térmica de 0,52 W/mK, e por Stancato (2006), cujos compósitos de *Pinus caribaea* apresentaram média de 0,68 W/mK. Conforme pode ser observado na figura a seguir.

FIGURA 49 – VALORES DE CONDUTIVIDADE TÉRMICA DOS BLOCOS PRODUZIDOS, COMPARADOS A ESTUDOS DE OUTROS PESQUISADORES



FONTE: A autora (2016).

8.4.4 Custo dos blocos

O custo dos blocos vazados produzidos foi calculado em 2014, quando da realização dos ensaios, razão pela qual foi criada uma relação entre o preço de um kg de cimento Portland CP-II Z e o preço do bloco, possibilitando, dessa forma que os valores possam ser corrigidos pelo preço atualizado do cimento.

Os valores, comparando a produção dos três traços de blocos estudados e o bloco convencional produzido na fábrica, estão apresentados na TABELA 32 a seguir. Para obtenção do custo do bloco basta multiplicar o valor do quilo do cimento Portland CP II-Z pelo índice da tabela.

TABELA 32 – PREÇO PARA PRODUÇÃO DOS BLOCOS TIPO A, B, C E BLOCO CLASSE C - FÁBRICA

| | Bloco Tipo A | Bloco Tipo B | Bloco Tipo C | Bloco Fábrica |
|-------------------------------------|--------------|--------------|--------------|---------------|
| Preço (R\$) – ref. ao Kg do cimento | 4,47 * kgCim | 5,20 * kgCim | 5,38 * kgCim | 3,52 * kgCim |
| Preço (R\$) - 2014 | 1,52 | 1,77 | 1,83 | 1,20 |

FONTE: A autora (2014).

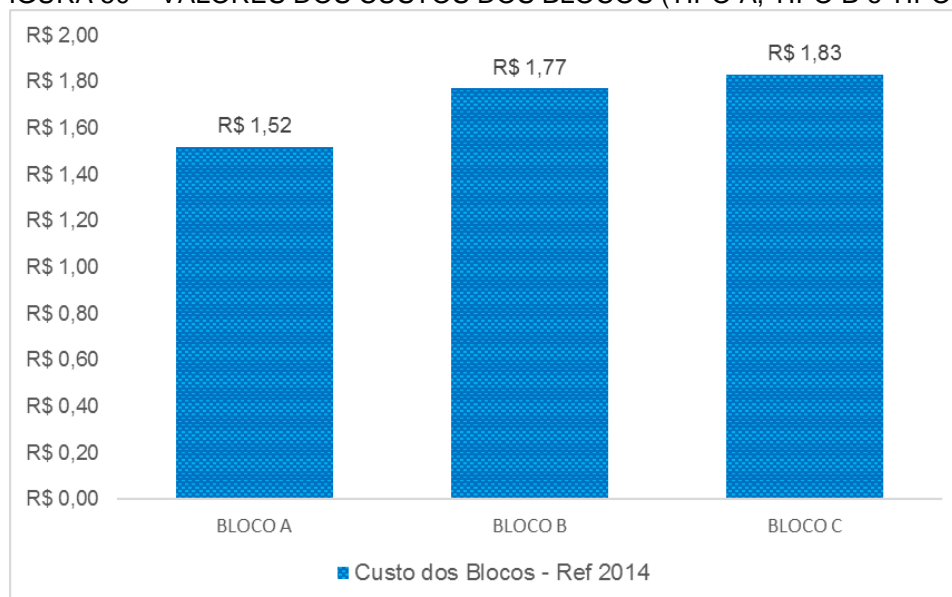
OBS: kgCim é o valor de um quilo de cimento Portland CP-II Z, sendo este considerado para cálculo R\$ 0,34/kg.

O cálculo para formação do custo do cavaco moído e peneirado, assim como as composições dos custos dos blocos pode ser encontrada nos APÊNDICES 5, 6, 7 e 8.

Um fator a ser considerado é que, na produção de blocos em grande escala, os cavacos devem ser moídos e peneirados em equipamentos industriais; com isso, pode-se reduzir o custo da produção.

Também no APÊNDICE 9 é apresentado o custo para a produção de bloco convencional de 14 x 19 x 39 m, da classe C, com resistência de 3 MPa, a partir das informações cedidas pela fabricante.

FIGURA 50 – VALORES DOS CUSTOS DOS BLOCOS (TIPO A, TIPO B e TIPO C)



FONTE: A autora (2014).

NOTA: BLOCO A – 1:1,5 , BLOCO B 1:2,2 , BLOCO C 1:2,2 (ARI)

Como pode ser observado na FIGURA 50, o custo dos blocos aumenta com a quantidade de cimento, como também com a utilização de CP V-ARI. A diferença de custo entre os blocos A e C é de 20%. O custo do bloco convencional é 27% menor que o custo do bloco A, que possui o menor custo entre os blocos produzidos, devido ao elevado valor do cimento Portland nas composições de madeira-cimento, enquanto o valor do cimento representa 56,76% do valor total do compósito, no bloco convencional corresponde a 28,8%. Acredita-se que o acréscimo de outros materiais, como areia e pedrisco, nos blocos de madeira-cimento poderia diminuir o custo; em contrapartida, aumentaria sua densidade. Sabe-se que a densidade do bloco convencional é de 1,5 g/cm³, sendo 54% mais pesado que o bloco C.

As vantagens na utilização dos blocos de madeira-cimento em comparação aos blocos tradicionais estão na baixa densidade, que acabam acarretando em diminuição dos custos de fundação, e facilidade de transporte interno na obra. Outra vantagem está na condutividade térmica menor que os blocos de madeira-cimento possuem em relação aos blocos tradicionais, sendo assim um bom isolante térmico.

Os blocos podem ser comparados ao bloco celular autoclavado (classe C12) que possui densidade média de $0,45 \text{ g/cm}^3$ com resistência à compressão axial de 1,2 MPa, e preço de mercado em 2014 igual a R\$ 3,70 com dimensões (7,5x30x60cm), sendo o preço de mercado de um bloco de concreto (classe C) igual a R\$ 2,20 com dimensões (14x19x39cm).

8.5 CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos neste capítulo, as seguintes conclusões podem ser apresentadas:

- É possível a fabricação de blocos utilizando cimento Portland e agregado vegetal, sem utilização de aditivos ou agregados minerais;
- Os três traços utilizados na produção dos blocos apresentam densidade menor que os blocos convencionais, sendo possível, assim, sua classificação como blocos leves de concreto, de acordo com a NBR 12655 (ABNT, 2015);
- Os blocos produzidos com traço 1:1,5 apresentaram a menor densidade;
- Os blocos produzidos com traço 1:2,2 apresentaram os maiores valores de resistência à compressão axial;
- Os blocos apresentaram reduções significativas de condutividade térmica em comparação a outros produtos cimentícios, demonstrando ser bons isolantes térmicos, conforme indicam outros estudos de compósitos de madeira-cimento;
- Devido à quantidade de cimento utilizada, os blocos apresentaram custo superior ao dos blocos convencionais de cimento. A utilização de outros materiais, como areia e pedrisco, pode contribuir para a redução desse custo, porém sua baixa densidade pode trazer redução expressa de frete e

transporte interno da obra. Também a leveza das paredes pode trazer alívio de carga nas fundações;

- Os blocos produzidos podem ser utilizados para fechamento e comparados com os blocos de concreto celular autoclavados, pois possuem baixa densidade e resistência à compressão axial equivalente aos blocos celulares classe C12.

9 CONSIDERAÇÕES FINAIS E RECOMENDAÇÕES

Para a finalização desse trabalho são apresentadas as seguintes considerações finais:

- A suspensão de Ca(OH)_2 utilizada como pré-tratamento das partículas de resíduos de madeira possibilitou reduzir o efeito da inibição, porém a quantidade de CaO empregada na sua fabricação deve levar em conta a dimensão das partículas empregadas;
- A dimensão das partículas demonstrou influenciar o comportamento do compósito, sendo que a classificação granulométrica das partículas aumenta os resultados da resistência à compressão axial comparado a compósitos produzidos com as partículas moídas sem peneiramento;
- Partículas de resíduos de madeira menores tenderam a apresentar melhores resultados de resistência à compressão axial;
- A vibração dinâmica demonstrou poder ser utilizada para moldagem de compósitos de madeira-cimento, mas se deve tomar cuidado com sua velocidade, pois, em excesso, pode causar segregação dos materiais;
- A utilização de aditivo mineral ou superplastificante não progrediu resultado para esse tipo de compósito, uma vez que resultou em aumento de custo, sem trazer aumento aos resultados mecânicos aos 28 dias;
- A relação madeira:cimento influenciou diretamente a densidade aparente do compósito; aumentando a quantidade de cimento ocorre um acréscimo na densidade aparente, assim como na resistência à compressão axial;
- A quantidade de água influenciou na resistência à compressão axial dos compósitos, que ao serem produzidos com pouca água resultaram menores resistências à compressão;
- Partículas de madeira de *Pinus* spp pré-tratadas com suspensão de Ca(OH)_2 e cimento Portland podem ser utilizados para a confecção de blocos leves de concreto, demonstrando serem bons isolantes térmicos. Entretanto, a quantidade necessária de cada material e o formato do bloco ainda devem ser analisados, de forma a obter um compósito com maior resistência à compressão axial.

Com base nos objetivos propostos para esta pesquisa, acredita-se que a inserção de resíduos de *Pinus* spp para a produção de compósitos leves de madeira-cimento alcançou os objetivos esperados. Podendo os blocos vazados serem utilizados para fechamento de alvenarias, possuindo baixas densidades e baixa condutividade térmica, demonstrando ser isolante térmico.

9.1 RECOMENDAÇÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

Considerando o objetivo principal da realização deste estudo, como recomendação à continuação deste, sugerem-se trabalhos na mesma linha de compósitos leves, analisando:

- A utilização de outros tipos de resíduos de madeira, como da construção civil ou da indústria de painéis aglomerados ou de MDF;
- A utilização de mistura entre as partículas retidas em peneiras diferentes;
- A utilização, além da madeira, de outro material mais fino para preenchimento dos vazios;
- Outros formatos de bloco (não vazados, por exemplo), que possam levar à produção de materiais leves e com maior resistência;
- O desempenho funcional de uma parede construída com os blocos;
- Análise microscópica da interface agregados e pasta de cimento;

REFERÊNCIAS

AGOPYAN, V. **Materiais reforçados com fibras para a construção civil nos países em desenvolvimento**: o uso de fibras vegetais. 1991. 204 p. Tese (Livre-Docência) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1991.

AÏTCIN, P. C. **Concreto de alto desempenho**. São Paulo: Pini, 2000.

AKUTSU, M.; SATO, N. M. N. **Propriedades termofísicas de materiais e componentes de construção**. São Paulo: Pini, 1988.

AL RIM, K. et al. Influence of the proportion of wood on the thermal and mechanical performances of clay-cement-wood composites. **Cement and Concrete Composites**, v. 21, n. 4, p. 269-276, 1999.

ALBERTO, M. M.; MOUGEL, E.; ZOULALIAN, A. Compatibility of some tropical hardwoods species with Portland cement using isothermal calorimetry. **Forest Products Journal**, v. 50, n. 9, p. 83-88, 2000.

ALVITO, J. A. S. A. M. **Comportamento estrutural de ligações em painéis de cement bonded particle boards**. 2013. 99 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2013.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE (ACI). **ACI Committee 318**: building code requirements for structural concrete (ACI 318-05) and commentary (318R-05). Farmington Hills, 2005.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – ASTM C518-10: Standard Test Method for Steady-State Thermal Transmission Properties by Means of the Heat Flow Meter Apparatus. West Conshohocken, PA, USA, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND (ABCP). **Básico sobre cimento**. Disponível em: <<http://www.abcp.org.br/conteudo/basico-sobre-cimento/adicoes/vantagens>>. Acesso em: 18 nov. 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 12094**: espuma rígida de poliuretano para fins de isolamento térmico – determinação da condutividade térmica – método de ensaio. Rio de Janeiro, 1991.

_____. **NBR 11578**: cimento Portland composto – especificação. Rio de Janeiro, 1997a.

_____. **NBR 7190**: projeto de estruturas de madeira – especificação. Rio de Janeiro, 1997b.

_____. **NBR NM 65**: cimento Portland – determinação do tempo de pega. Rio de Janeiro, 2003.

_____. **NBR NM 248:** Agregados - Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.

_____. **NBR NM 7500-1:** Calibração de máquinas de ensaio estático uniaxial . Rio de Janeiro, 2004

_____. **NBR 5739:** concreto – ensaios de compressão de corpos-de-prova cilíndricos – especificação. Rio de Janeiro, 2007.

_____. **NBR 15220:** desempenho térmico de edificações – especificação. Rio de Janeiro, 2008a.

_____. **NBR 5738:** concreto – procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova – especificação Rio de Janeiro, 2008b.

_____. **NBR 15900:** água para amassamento do concreto – especificação. Rio de Janeiro, 2009a.

_____. **NBR 7211:** agregados para concreto – especificação. Rio de Janeiro, 2009b.

_____. **NBR 11768:** aditivos químicos para concreto de cimento Portland – requisitos. Rio de Janeiro, 2011.

_____. **NBR 13440:** blocos de concreto celular autoclavado — métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2013.

_____. **NBR 6118:** projeto de estruturas de concreto – procedimento. Rio de Janeiro, 2014a.

_____. **NBR 6136:** blocos vazados de concreto simples para alvenaria – requisitos. Rio de Janeiro, 2014b.

_____. **NBR 12118:** blocos vazados de concreto simples para alvenaria – métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2014c.

_____. **NBR 12655:** concreto de cimento Portland - Preparo, controle, recebimento e aceitação - Procedimento. Rio de Janeiro, 2015

_____. **NBR 15270-1:** componentes cerâmicos Parte 1: Blocos cerâmicos para alvenaria de vedação - Terminologia e requisitos. Rio de Janeiro, 2015

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PRODUTORES DE FLORESTAS PLANTADAS (ABRAF). **Anuário estatístico da ABRAF 2012** – ano base 2011. 2012. Disponível em: <<http://www.abraflor.org.br/estatisticas.asp>>. Acesso em: 20 jul. 2013.

_____. **Anuário estatístico da ABRAF 2013** – ano base 2012. 2013. Disponível em: <<http://www.abraflor.org.br/estatisticas.asp>>. Acesso em: 20 set. 2014.

BADEJO, S. O. O. Effect of flake geometry on properties of cement-bonded particleboard from mixed tropical hardwoods. **Wood Science and Technology**, n. 22, p. 357-370, 1988.

BARBOSA, L. C. et al. Avaliação dos resíduos de uma serraria para a produção de celulose kraft. **Ciência Florestal**, v. 24, n. 2, p. 491-500, 2014.

BARNES, D. A model of the effect of strand length and strand thickness on the strength properties of oriented wood composites. **Forest Products Journal**, v. 51, n. 2, p. 36-46, 2001.

BEJO, L.; TAKATS, P.; VASS, N. Development of cement bonded composite beams. **Act Silv. Lign. Hung.**, v. 1, p. 111-119, 2005.

BERALDO, A. L. Materiais não-convencionais para construções rurais. [S.l.: s.n.], 1997.

BERALDO, A. L.; CARVALHO, J. V. Compósito *Eucalyptus grandis*-cimento Portland. **Sci Forestalis**, v. 65, n. 6, p. 150-161, 2004.

BERALDO, A. L. et al. Compósitos à base de resíduos vegetais e cimento Portland. In: ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA, 8., 2002, Uberlândia. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2002. v. 1. p. 120-126.

BERTOLINI, M. et al. **Wood-cement composites from wastes of Pinus sp. wood: effect of particles treatment.** [S.l.: s.n.], 2014.

BESSER. **The concrete Century.** 2004. Disponível em: <<http://besser.com/about/history#search=%22%22block%20machine%22%20besser%20history%20pdf%22>>. Acesso em: 12 set. 2013.

BRAND, M. A. et al. Caracterização do rendimento e quantificação dos resíduos gerados em serraria através do balanço de materiais. **Floresta**, Curitiba, v. 32, n. 2, p. 247-259, 2002.

BUDINSKI, K. G.; BUDINSKI, M. K. **Engineering materials.** *Nature*, v. 25, p. 28, 2009.

BUSNARDO, C. A. et al. Umidade ao abate da madeira e da casca de *Eucalyptus grandis*. **Silvicultura**, v. 8, n. 28, p. 749-753, 1983.

BUTTLE, A. M. **Uso de agregados reciclados de concreto em blocos de alvenaria estrutural.** 2007. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

CABANGON, R. J.; CUNNINGHAM, R. B.; EVANS, P. D. Manual strand orientation as a means of improving the flexural properties of wood-wool cement board in the Philippines. **Forest Products Journal**, v. 52, n. 4, p. 53-59, 2002.

CALLISTER JR, W. D. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. Rio de Janeiro: LTC, 2002.

CARMO, J. B. M. **Análise comparativa do desempenho de concretos compostos com sílica ativa e metacaulim face à resistência mecânica e à viabilidade econômica**. 2006. 136 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2006.

CARVALHO, J. V. **Aproveitamento de resíduos particulados da madeira de *Eucalipto grandis* na fabricação de compósitos a base de cimento Portland**. 2000. 82 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2000.

CASTRO, V. G. **Utilização de espécies da Amazônia na produção de compósitos madeira-cimento por vibro-compactação**. 2015. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2015.

CHATVEERA, B.; LERTWATTANARUK, P. Evaluation of sulfate resistance of cement mortars containing black rice husk ash. **Journal of Environmental Management**, v. 90, n. 3, p. 1435-1441, 2009.

CHINDAPRASIRT, P.; RUKZON, S.; SIRIVIVATNANON, V. Resistance to chloride penetration of blended Portland cement mortar containing palm oil fuel ash, rice husk ash and fly ash. **Constr Build Mater**, n. 22, p. 932-938, 2008.

CHIPANSKI, E. R. **Proposição para melhoria do desempenho ambiental da indústria de aglomerado no Brasil**. 2006. 193 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2006.

COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL (CETESB). **Resíduos sólidos industriais**. São Paulo, 1985.

COSTA, A. **Coletâneas de anatomia da madeira**. Disponível em: <<http://www.joinville.udesc.br/sbs/professores/arlando/materiais/APOSTILANATOMIA1.pdf>>. Acesso em: 08/06/2013

COSTA, M. L. B. **Caracterização das propriedades físicas, mecânicas e térmicas de betões com incorporação de cortiça**. 2011. Tese (Doutorado) – Universidade de Coimbra, Coimbra, 2011.

COUTINHO, J. S. The combined benefits of CPF and RHA in improving the durability of concrete structures. **Cement and Concrete Composites**, v. 25, n. 1, p. 51-59, 2003.

COUTTS, R. S. P.; NI, P. The relationship between wood pulp fibre properties and fibre cement composite performance. In: APPITA ANNUAL GENERAL CONFERENCE, 49., 1995, Australia. **Proceedings...** Australia: Technical Association of the Australian and New Zealand Pulp and Paper Industry, 1995.

DAL MOLIN, D. C. C. Adições minerais para concreto estrutural. In: _____. **Concreto: ensino, pesquisa e realizações**. São Paulo: Ibracon, 2005. v. 2. p. 345-379.

DARGAHI-ZABOLI, M.; ALIZADEH, R. Using dynamic model for determination of heat losses in cold weather from a typical house in Tabriz constructed by lightweight concrete blocks. **Energy Efficiency**, v. 7, n. 4, p. 609-626, 2014.

DEL COZ DÍAZ, J. J. et al. Thermal design optimization of lightweight concrete blocks for internal one-way spanning slabs floors by FEM. **Energy and Buildings**, v. 41, n. 12, p. 1276-1287, 2009.

DEL MENEZZI, C. H. S.; CASTRO, V. G.; SOUZA, M. R. Production and properties of a medium density wood-cement boards produced with oriented strands and silica fume. **Maderas, Ciencia y Tecnología**, v. 9, n. 2, p. 105-115, 2007.

DIAS, F. M.; LAHR, F. A. R. Estimativa de propriedades de resistência e rigidez da madeira através da densidade aparente. **Scientia Forestalis**, n. 65, p. 102-113, jun. 2004.

EVANS, P. D. et al. Summary: an introduction to wood-cement composites. In: WOOD-CEMENT COMPOSITES IN THE ASIA-PACIFIC REGION, 2000, Australia. **Proceedings...** Australia: ACIAR, 2000.

FAN, M. et al. Cement-bonded composites made from tropical woods: compatibility of wood and cement. **Construction and Building Materials**, v. 36, p. 135-140, 2012.

FARIA, G. **Comportamento estrutural de pilares construídos com CBPB**. 2010. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2010.

FOELKEL, C. E. B.; BRASIL, M. A. M.; BARRICHELO, L. E. G. Métodos para determinação da densidade básica de cavacos para coníferas e folhosas. **IPEF**, Piracicaba, v. 2, n. 3, p. 65-74, 1971.

FOELKEL, C. E. B.; MILANEZ, A. F.; BUSNARDO, C. A. Método do máximo teor de umidade aplicado a determinação de densidade básica da madeira do eucalipto. **Silvicultura**, v. 8, n. 28, p. 792-796, 1983.

FOLLETO, E. L. et al. Aplicabilidade das cinzas da casca de arroz. **Química Nova**, v. 28, n. 6, p. 1055-1060, 2005.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS (FAO). **FAO Rice Market Monitor (RMM)**. 2014. Disponível em: <<http://www.fao.org/economic/est/publications/rice-publications/rice-market-monitor-rmm/en/>>. Acesso em: 18 jul. 2014.

FRASSON JR, A. **Metodologia de dosagem e processo produtivo de blocos de concreto para alvenaria estrutural**. 2000. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2000.

FREIRE, W. J. Materiais alternativos de construção. In: _____. **Construções rurais: materiais**. Rio de Janeiro: LTC, 1991.

FREITAS, A. R. **Probabilistic approach in the design of wood strutures in Brazil based on the variability of 23 species**. Blacksburg: Virginia Polytechnic Institute, 1978.

FREITAS, L. C. **A baixa produtividade e o desperdício no processo de beneficiamento da madeira: um estudo de caso**. 2000. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2000.

FRYBORT, S. et al. Cement bonded composites – a mechanical review. **BioResources**, v. 3, n. 2, p. 602-626, 2008.

FUSCO, P. B. **Estruturas de concreto**: fundamentos estatísticos das seguranças das estruturas. São Paulo: McGraw-Hill, 1976.

GANESAN, K.; RAJAGOPAL, K.; THANGAVEL, K. Rice husk ash blended cement: assessment of optimal level of replacement for strength and permeability properties of concrete. **Constr Build Mater**, n. 22, p. 1675-1683, 2008.

GÜTHS, S. **Um método transiente para medição de propriedades térmicas**. 1990. 146 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1990.

HACHMI, M.; CAMPBELL, A. G. Wood-cement chemical relationships. In: INORGANIC BONDED WOOD AND FIBER COMPOSITE MATERIALS. SESSION II: RAW MATERIAL CONSIDERATIONS, 1., 1989, Washington, D.C. **Proceedings...** Washington, D.C.: [s.n.], 1989. v. 1. p. 43-47.

HELLMEISTER, J. C. Madeira e suas características. In: ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA, 1983, São Carlos. **Anais...** São Carlos: USP, 1983. v. 1. p. 37-42.

HON, D. N. S.; SHIRAIASHI, N. **Wood and cellulosic chemistry**. New York: Marcel Dekker, 2001.

HSU, E. W. **Process for making wood composite employing blast-furnace slag as the binder**. US patent n. 5171496. [S.l.: s.n.], 1992.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Produção mundial de arroz**. Disponível em: <[http:// www.ibge.gov.br](http://www.ibge.gov.br)>. Acesso em: jan. 2016.

INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS (IBAMA). **Desmatamento**. Disponível em: <<http://www.ibama.gov.br/areas-tematicas/desmatamento>>. Acesso em: jan. 2015.

INSTITUTO Carbono Brasil. Disponível em: <<http://www.carbonobrasil.com.br/>>. Acesso em: 1 jun. 2014.

INSTITUTO DE PESQUISAS E ESTUDOS FLORESTAIS (IPEF). **Programa Cooperativo sobre Produtividade Potencial do *Pinus* no Brasil**. Disponível em: <<http://www.ipef.br/pppib/>>. Acesso em: 20 set. 2014.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS (IPT). **Madeira: o que é e como pode ser processada e utilizada**. São Paulo, 1985. (Boletim ABPM, n. 36).

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **Climate change 2013: the physical science basis**. Cambridge: Cambridge University Press, 2013. Disponível em: <http://www.climatechange2013.org/images/report/WG1AR5_TS_FINAL.pdf>. Acesso em: set. 2014.

IVKOVIC, M. et al. Prediction of wood stiffness, strength, and shrinkage in juvenile wood of radiata pine. **Wood Sci Technol**, n. 43, p. 237-257, 2009.

IWAKIRI, S. **A influência das variáveis de processamento sobre propriedades de chapas de partículas de diferentes espécies de *Pinus***. 1989. 130 f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1989.

_____. **Painéis de madeira reconstituída**. Curitiba: FUPEF, 2005.

IWAKIRI, S. et al. Resíduos de serraria na produção de painéis de madeira aglomerada de eucalipto. **Scientia Agrária**, Curitiba, v. 1, n. 1-2, p. 23-28, 2000.

JOHN, V. M.; AGOPYAN, V. Materiais reforçados com fibras vegetais. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE MATERIAIS REFORÇADOS COM FIBRAS PARA A CONSTRUÇÃO CIVIL, 1993, São Paulo. **Anais...** São Paulo: EPUSP, 1993. p. 29-38.

KARADE, S. R.; IRLE, M.; MAHER, K. Influence of granule properties and concentration on cork-cement compatibility. **Holz als Roh-und Werkstoff**, v. 64, n. 4, p. 281-286, 2006.

KAYALI, O. Fly ash lightweight aggregates in high performance concrete. **Construction and Building Materials**, v. 22, n. 12, p. 2393-2399, 2008.

KLOCK, U. **Qualidade da madeira juvenil de *Pinus maximinoi* H. E. Moore**. 2000. 275 f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2000.

KOLLMANN, F. F. P.; CÔTÈ, W. A. **Principles of wood science and technology**. New York: Springer-Verlag, 1968. v. 1.

KUNTZ, L. M. **The “greening” of the concrete industry**: factors contributing to sustainable concrete. 2006. Thesis (PhD) – Massachusetts Institute of Technology, Massachusetts, 2006.

LA SERNA, H. A.; REZENDE, M. M. **Agregados para a construção civil**. Brasília, DF: DNPM, 2009. Disponível em: <<http://anepac.org.br/wp/wp-content/uploads/2011/07/DNPM2009.pdf>>. Acesso em: 22 set. 2014.

LAHR, F. A. R. **Considerações a respeito da variabilidade de propriedade de resistência e de elasticidade da madeira**. 1990. Tese (Livre-Docência) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1990.

LANGE, H.; SIMATUPANG, M. H.; NEUNAUER, A. Influence of latent hydraulic binders on the properties of woodcement composite. In: INORGANIC BONDED WOOD AND FIBER COMPOSITE MATERIALS. SESSION II: RAW MATERIAL CONSIDERATIONS, 1., 1989, Washington, D.C. **Proceedings...** Washington, D.C.: [s.n.], 1989. p. 48-52.

LATORRACA, J. V. F.; IWAKIRI, S. Painéis de madeira-cimento. In: IWAKIRI, S. **Painéis de madeira reconstituída**. Curitiba: FUPEF, 2005. p. 213-239.

LEE, A.W.C. Effect of cement/wood ratio on bending properties of cement-bonded southern pine excelsior board. **Wood and Fiber Science**, Madison, v. 17, n. 3, p. 361-364, 1985

LIMA, A. J. M. **Utilização de resíduo de *Pinus* spp e materiais cimentícios alternativos na produção de blocos para alvenaria estrutural**. 2009. 281 f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2009.

LIMA, A. F.; JARÁ, E. R. P.; ALFONSO, V. A. Madeira como matéria-prima para fabricação de pasta celulósica. In: PHILIPP, P.; D'ALMEIDA, M. L. O. **Celulose e papel: tecnologia de fabricação da pasta celulósica**. 2. ed. São Paulo: IPT, 1988. p. 129-167.

LIMA, A. J. M.; IWAKIRI, S. Produtos alternativos na produção de blocos para alvenaria estrutural. **Floresta e Ambiente**, v. 18, n. 3, p. 310-323, 2011.

_____. Utilização de resíduos de madeira de *Pinus* spp, cinza volante e escória de alto-forno em compósitos cimento-madeira. **Floresta**, Curitiba, v. 42, n. 3, p. 639-650, 2012.

LIPINSKI, E. Potencial technologies for effectively bonding wood with inorganic binders. In: INTERNATIONAL INORGANIC-BONDED WOOD AND FIBER COMPOSITE MATERIALS CONFERENCE, 1994, Washington, D.C. **Proceedings...** Washington, D.C.: Spokane, 1994. p. 53-58.

LORDSLEEM JR, A. C. et al. Blocos de concreto para vedação: estudo da conformidade através de ensaios laboratoriais. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 28., 2008, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: APEBRO, 2008.

MA, L. F. et al. Production and properties of oriented cement-bonded boards from Sugi (*Cryptomeria japonica* D. Don). In: WOOD-CEMENT COMPOSITES IN THE

ASIA-PACIFIC REGION, 2000, Australia. **Proceedings...** Australia: [s.n.], 2000. p. 140-147.

MAKAR, J. M.; CHAN, G. W. End of induction period in ordinary Portland cement as examined by high-resolution scanning electron microscopy. **Journal of the American Ceramic Society**, v. 91, n. 4, p. 1292-1299, Apr. 2008.

MALLARI JR, V. C. et al. Development of a rapid curing process for cement-bonded board manufacture. In: INORGANIC WOOD AND FIBER COMPOSITE MATERIALS, 5., 1997, Madison. **Proceedings...** Madison: Forest Products Research Society, 1997. p. 147-152.

MARTINS, S. C. F. **Pisos de argamassa reforçada com partículas de bambu**. 2002. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2002.

MASSAZZA, F. Pozzolana and pozzolanic cements. In: HEWLETT, P. C. **Lea's chemistry of cement and concrete**. 4. ed. London: Arnold, 1998.

MATOS, J. L. M. **Estudos sobre a produção de painéis estruturais de lâminas paralelas de *Pinus taeda* L.** 1997. 117 f. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1997.

MATOSKI, A. **Utilização de pó de madeira com granulometria controlada na produção de painéis de cimento-madeira**. 2005. 187 p. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005.

MATOSKI, A.; IWAKIRI, S. Avaliação das propriedades físico-mecânicas de painéis de cimento-madeira utilizando farinha de madeira com granulometria controlada. **Floresta**, Curitiba, v. 37, n. 2, p. 149-158, 2007.

MEDEIROS, J. S. **Alvenaria estrutural não armada de blocos de concreto: produção de componentes e parâmetros de projeto**. 1993. 449 p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1993.

MEDEIROS, J. S.; DORNELLES, V. P.; FRANCO, L. S. Blocos de concreto para alvenaria estrutural: avaliação de parâmetros básicos de produção. In: INTERNATIONAL SEMINAR ON STRUCTURAL MASONRY FOR DEVELOPING COUNTRIES, 5., 1994, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: [s.n.], 1994.

MEDEIROS, J. S.; SABBATINI, F. H. **Alvenaria estrutural não armada de blocos de concreto: produção de componentes e parâmetros de projeto**. São Paulo: USP, 1993. (Boletim Técnico).

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. São Paulo: Ibracon, 2008.

MIYATAKE, A. et al. Manufacture of wood strand-cement composite for structural use. In: WOOD-CEMENT COMPOSITES IN THE ASIA-PACIFIC REGION, 2000, Australia. **Proceedings...** Australia: [s.n.], 2000. p. 148-152.

MOSLEMI, A. A. Particle geometry. In: _____. **Particleboard**. [S.I.]: Souther Illinois University, 1974. v. 1. p. 49-67.

_____. Wood-cement panel products: coming of age. In: INORGANIC BONDED FIBER COMPOSITES SYMPOSIUM, 1., 1989. **Proceedings...** [S.I.]: Forest Products Research Society, 1989. p. 12-18.

_____. Emerging technologies in mineral-bonded wood and fiber composites. **Advanced Performance Materials**, v. 6, n. 2, p. 161-179, 1999.

MOSLEMI, A. A.; PFISTER, S. C. The influence of cement-wood ratio and cement type on bending strength and dimensional stability of wood-cement composite panels. **Wood and Fiber Science** 19 (2): 165-175, 1987

NAZERIAN, M.; GHALEHNO, M. D.; GOZALI, E. Effects of wood species, particle sizes and dimensions of residue obtained from trimming of wood-cement composites on physical and mechanical properties of cement-bonded particleboard. **Wood Material Science & Engineering**, v. 6, n. 4, p. 196-206, 2011.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. 2. ed. São Paulo: Pini, 1997.

NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J. **Tecnologia do concreto**. Porto Alegre: Bookman, 2ªed, 2013.

NOLASCO, A. M. **Resíduos da colheita e beneficiamento da caixeta – *Tabebuia cassinoides* (Lam.) DC: caracterização e perspectivas**. 2000. 170 p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2000.

OLIVEIRA, A. L. **Contribuição para a dosagem e produção de peças de concreto para pavimentação**. 2004. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004.

OLIVEIRA, E. et al. Correlações entre parâmetros de qualidade da madeira de *Eucalyptus grandis* Hill ex-Maiden. **Boletim Técnico da SIF**, Viçosa, n. 2, p. 1-9, 1990.

OLIVEIRA, J. T. S. **Caracterização da madeira de eucalipto para a construção civil**. 1997. 429 f. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1997.

OLORUNNISOLA, A. O. Effects of husk particle size and calcium chloride on strength and sorption properties of coconut husk-cement composites. **Industrial Crops and Products**, n. 29, p. 495-501, 2009.

PAPADOPOULOS, A. N. **Mechanical Properties and Decay Resistance of Hornbeam Cement Bonded Particleboards**. 2008

PARCHEN, C. F. A. **Compósito madeira cimento de baixa densidade produzido com método de compactação vibro dinâmica**. 2012. 172 f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2012.

PEDROZO, E. C. **Estudo da utilização de cinza da casca do arroz residual em concretos estruturais**: uma análise da durabilidade aos cloretos. 2008. 143 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2008.

PEREIRA, H.; GRAÇA, J.; RODRIGUES, J. C. Wood chemistry in relation to quality. In: BARNETT, J. R.; JERONIMIDIS, G. (Ed.). **Wood quality and its biological basis**. [S.l.]: CRC Press, 2003. p. 53-86.

PETRUCCI, E. G. **Concreto de cimento Portland**. Rio de Janeiro: Globo, 1971.

PINTO, M. L. **Propriedades e características da madeira de teca (*Tectona grandis*) em função da idade**. 2007. 124 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007.

PILECCO SILICA LTDA. **Ficha técnica da Sílica da casca de arroz**. Disponível em: <<http://www.pilecconobre.com.br/sustentabilidade/silica-e-energia-renovavel>> Acesso em 14/05/2014

POSI, P. et al. Pressed lightweight concrete containing calcined diatomite aggregate. **Construction and Building Materials**, n. 47, p. 896-901, 2013a.

_____. Lightweight geopolymers concrete containing aggregate from recycle lightweight block. **Materials & Design**, n. 52, p. 580-586, 2013b.

RAMIREZ-CORETTI, A.; ECKELMAN, C. A.; WOLFE, R. W. Inorganic-bonded composite wood panel systems for low-cost housing: a Central American perspective. **For. Prod. J.**, v. 48, n. 4, p. 62-68, 1998.

RECH, C. Estudo sugere uso de serragem como insumo. **Revista da Madeira**, Curitiba, n. 66, 2002.

RIXON, R.; MAILVAGANAN, M. **Chemical admixtures for concrete**. 3. ed. London: E&FN Spon, 1999.

SALVADOR FILHO, J. A. A. **Blocos de concreto para alvenaria em construções industrializadas**. 2007. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

SAVASTANO JR, H. **Materiais à base de cimento reforçados com fibra vegetal**: reciclagem de resíduos para a construção de baixo custo. 2000. 144 f. Tese (Livre-Docência) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.

SEMPLE, K. E.; EVANS, P. D. **Wood-cement composites** – suitability of Western Australian mallee eucalypt, blue gum and melaleucas. [S.l.]: Kingston, 2004.

SERRANO, J. S.; CASTRO, J. V. Materiales de construcción con propiedades aislantes a base de cascara de arroz. **Informes de la Construcción**, Madrid, v. 37, n. 372, p. 53-64, 1985.

SILVA, G. C. et al. Produção de painéis de cimento-madeira com adição de diferentes proporções de casca e microsilica. **Ciência Florestal**, v. 16, n. 1, p. 61-70, 2006.

SILVA, L. C. F. **Análise das propriedades mecânicas e térmicas de tijolos solo-cimento com e sem adição do pó da fibra de coco**. 1999. 148 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 1999.

SIMATUPANG, M. H. Der Wasserbedarf bei der Herstellung zementgebunder Holzspanplatten. **Holz als Roh-und Werkstoff**. v. 27. p.379-382. 1979

SIMATUPANG, M. H.; LANGE, H.; NEUBAUER, A. Einfluss der Lagerung von Pappel, Birke, Eiche und Lärche sowie des Zusatzes von SiO₂-Feinstaub auf die Biegefestigkeit zementgebundener Spanplatten. **Holz Roh Werkst**, n. 45, p. 131-136, 1987.

SIMATUPANG, M. H.; SCHWARZ, G. H.; BROKER, F. W. Small scale plants for the manufacture of mineral-bonded wood composites. In: WORLD FORESTRY CONGRESS, 8., 1978, Jakarta. **Proceedings...** Jakarta: [s.n.], 1978.

SIMATUPANG, M. H. et al. Influence of wood species on the setting of cement and gypsum. In: INTERNATIONAL CONFERENCE OF FIBER AND PARTICLEBOARD WITH INORGANIC BINDER, 1988, Spokane. **Proceedings...** Spokane: [s.n.], 1988. p. 33-42.

_____. **Influence of wood species on the setting of cement and gypsum**. [S.l.: s.n.], 1989.

SOUSA, J. G. G. **Contribuição ao estudo da relação entre propriedades e proporcionamento de blocos de concreto**: aplicação ao uso de entulho como agregado reciclado. 2001. 120 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2001.

SOUZA, A. A. C. **Utilização de resíduos da indústria madeireira para fabricação de chapas cimento-madeira**. 2006. 147 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Pará, Belém, 2006.

SPIRATOS, N.; JOLICOEUR, C. Trends in concrete chemical admixtures for the 21st century. In: CANMET/ACI INTERNATIONAL CONFERENCE ON SUPERPLASTICIZERS, 6., 2000, Nice. **Proceedings...** Nice: [s.n.], 2000.

STAHL, D. C. et al. Lightweight concrete masonry with recycled wood aggregate. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 14, n. 2, p. 116-121, 2002.

STANCATO, A. C. **Caracterização de compósitos à base de resíduos vegetais e argamassa de cimento modificada pela adição de polímeros para a fabricação de blocos vazados**. 2006. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2006.

TANGO, C. E. S. **Blocos de concreto**: dosagem, produção e controle de qualidade. São Paulo: IPT, 1984. v. 1.

TAYLOR, H. F. W. **Cement chemistry**. London: [s.n.], 1990.

TEIXEIRA, M. G. **Aplicação de conceitos da ecologia industrial para a produção de materiais ecológicos**: o exemplo do resíduo de madeira. 2005. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2005.

TEIXEIRA, M. G.; CÉSAR, S. F. Produção de compósito com resíduo de madeira no contexto da ecologia industrial. **Madeira: Arquitetura e Engenharia**, v. 7, n. 19, 2012.

TORKAMAN, J.; ASHORI, A.; MOMTAZI, A. S. Using wood fiber waste, rice husk ash, and limestone powder waste as cement replacement materials for lightweight concrete blocks. **Construction and Building Materials**, n. 50, p. 432-436, 2014.

TSENG, Y. C. et al. **New carboxylic acid-based superplasticizer for high-performance concrete**. Farmington Hills: ACI, 2000. (ACI Special Publication, v. 195).

ULIANA, L. R. **Diagnóstico da geração de resíduos na produção de móveis**: subsídios para a gestão empresarial. 2005. 101 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) – Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2005.

VERONEZ, M. **Estudo da influência do tipo de aditivo superplastificante e de adição mineral no comportamento termo-mecânico dos concretos de alto desempenho**. 2006. 214 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2006.

VITAL, B. R., HASELEIN, C. R., LUCIA, R. M. D. **Efeito da geometria das partículas nas propriedades das chapas de madeira aglomerada de Eucalyptus grandis** (Hill exMaiden). *Revista Árvore*, v. 16. n. 1. p. 88-96. 1992

WEI, Y.; MIN, Z. Y. G; TOMITA, B. **Study of hydration behavior of wood cement-based composite II**: effect of chemical additives on the hydration characteristics and strengths of wood cement composites. Japan: The Japan Wood Research Society, 2000.

WEI, Y.; TOMITA, B. **Effects of additive materials on mechanical and dimensional properties of wood cement-bonded boards**. Japan: The Japan Wood Research Society, 2000.

WERKEMA, M. C. C.; AGUIAR, S. **Planejamento e análise de experimentos: como identificar as principais variáveis influentes em um processo**. Belo Horizonte: Fundação Christiano Ottoni, 1996.

WOLFE, R. W.; GJINOLLI, A. Cement-bonded wood composites as an engineering material. In: _____. **The use of recycled wood and paper in building applications**. Madison: [s.n.], 1997. p. 84-91.

YADAMA, V. **Characterization and modeling of oriented strand composites**. 2002. Thesis (PhD) – Washington State University, Pullman, 2002.

YAMAJI, F. M. **Produção de compósito plástico-madeira a partir de resíduos da indústria madeireira**. 2004. 182 f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2004.

YOUNGQUIST, J. A. **Wood-based composites and panel products**. [S.l.: s.n.], 1999.

ZANETTI, J. J. Falhas dos processos de laboratório que comprometem a avaliação dos resultados de resistência dos concretos. **Concreto e Construções**, São Paulo, ano 38, n. 152, p. 31-39, out./nov./dez. 2010.

ZHOU, Y.; KAMDEM, D.P. **Effect of cement/wood ratio on the properties of cement-bonded particleboard using CCA-treated wood removed from service**. *Forest Products Journal* 52 (2): 73-81. 2002

ZUCCO, L. L. **Estudo da viabilidade de fabricação de placas de compósitos à base de cimento e casca de arroz**. 1999. 118 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1999.

APÊNDICES

APÊNDICE 1 – QUADRO RESUMO DA ETAPA I DE ESTUDOS

| | Tratamento | Relação Água:cal | Vibração | Partículas |
|-------------------|------------|------------------------------------------|----------|------------|
| Capítulo 4 | 111 | 4,7 : 1 | 220 N | #2,36 |
| | 112 | | | #4,75 |
| | 113 | | | #6,3 |
| | 114 | | | T1 |
| | 115 | | | T2 |
| | 121 | 6,25 : 1 | 220 N | #2,36 |
| | 122 | | | #4,75 |
| | 123 | | | #6,3 |
| | 124 | | | T1 |
| | 125 | | | T2 |
| | 131 | 7,8 : 1 | 220 N | #2,36 |
| | 132 | | | #4,75 |
| | 133 | | | #6,3 |
| | 134 | | | T1 |
| | 135 | | | T2 |
| Capítulo 5 | 121 | Melhor resultado do capítulo 04 | 220 N | #2,36 |
| | 122 | | | #4,75 |
| | 123 | | | #6,3 |
| | 124 | | | T1 |
| | 125 | | | T2 |
| | 221 | | 440 N | #2,36 |
| | 222 | | | #4,75 |
| | 223 | | | #6,3 |
| | 224 | | | T1 |
| | 225 | | | T2 |

FONTE: A autora (2016).

LEGENDA : T1 – Material moído uma vez

T2 – Material moído duas vezes.

#2,36 – Material retido na peneira 2,36 mm,

#4,75 – Material retido na peneira 4,75 mm

#6,30 – Material retido na peneira 6,3 mm

APÊNDICE 2 – QUADRO RESUMO DA ETAPA II DE ESTUDOS

| | Tratamento | Relação Água:cal | Vibração | Partículas | Aditivo |
|-------------------|------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-----------------------------------------|
| Capítulo 6 | 1 | Melhor resultado Cap 04 | Melhor resultado Cap 05 | Melhor resultado Cap 05 | Sílica 3% |
| | 2 | | | | Sílica 5% |
| | 3 | | | | Sílica 3% + superplastificante 3% |
| | 4 | | | | Sílica 5% + superplastificante 3% |
| | 5 | | | | Superplastificante 3% |
| | 6 | | | | Sem aditivo |

FONTE: A autora (2016).

APÊNDICE 3 – QUADRO RESUMO DA ETAPA III DE ESTUDOS

| | Tratamento | Relação Água:cal | Vibração | Adição de Água | Relação Madeira:cimento |
|-------------------|------------|---------------------|---------------------|-------------------|----------------------------|
| Capítulo 7 | A | Resultado Cap 04 | Resultado Cap 05 | 30% | 1:1,5 |
| | B | | | 30% | 1:2,0 |
| | C | | | 30% | 1:2,2 |
| | D | | | 20% | 1:1,5 |
| | E | | | 20% | 1:2,0 |
| | F | | | 20% | 1:2,2 |

FONTE: A autora (2016).

APÊNDICE 4 – QUADRO RESUMO DA ETAPA IV DE ESTUDOS

| | Tratamento | Cimento Portland | Relação Água:cal | Adição de Água | Relação Madeira:cimento |
|-------------------|------------|---------------------|---------------------|---------------------|----------------------------|
| Capítulo 8 | A | CP-II Z | Resultado Cap 04 | Resultado Cap 07 | 1:1,5 |
| | B | CP-II Z | | | 1:2,2 |
| | C | CP V ARI | | | 1:2,2 |

FONTE: A autora (2016).

APÊNDICE 5 – COMPOSIÇÃO DE PREÇO DE CAVACO MOÍDO E PENEIRADO

| Cavacos para blocos | | | | | kg |
|-----------------------------------|--------------|---------------|--------------|--------------|-----------|
| Retidos na peneira de 2,36 mm | | | | | |
| MATERIAIS | | | | | |
| Material | Unid. | Quant. | Preço | Total | |
| Cavaco de madeira bruto | kg | 4,53 | R\$ 0,0480 | R\$ | 0,21 |
| Subtotal | | | | R\$ | 0,21 |
| EQUIPAMENTOS + MÃO DE OBRA | | | | | |
| Mão de obra | Unid. | Quant. | Preço | Total | |
| Secagem | kg | 1,00 | R\$ 0,0100 | R\$ | 0,01 |
| Moagem | kg | 1,00 | R\$ 0,0204 | R\$ | 0,02 |
| Peneiramento | kg | 1,00 | R\$ 0,0108 | R\$ | 0,01 |
| Subtotal | | | | R\$ | 0,04 |
| Total | | | | R\$ | 0,25 |

FONTE: A autora (2016). Base: 2014

APÊNDICE 6 – COMPOSIÇÃO DE PREÇO DE BLOCO DE MADEIRA-CIMENTO DE 14 X 19 X 39 MM (TIPO A)

| Bloco de madeira-cimento | | | | | Unid. |
|---------------------------------|--------------|---------------|--------------|--------------|--------------|
| Traço de 1:1,5 | | | | | |
| MATERIAIS | | | | | |
| Material | Unid. | Quant. | Preço | Total | |
| Cavaco de madeira #2,36 | kg | 65,60 | R\$ 0,25 | R\$ | 16,40 |
| Cimento CP II-Z | kg | 85,60 | R\$ 0,34 | R\$ | 29,10 |
| Cal virgem | kg | 10,50 | R\$ 0,30 | R\$ | 3,15 |
| Subtotal | | | | R\$ | 48,65 |
| MÃO DE OBRA | | | | | |
| Mão de obra | Unid. | Quant. | Preço | Total | |
| Operário | h | 0,70 | R\$ 17,50 | R\$ | 12,25 |
| Subtotal | | | | R\$ | 12,25 |
| TOTAL | | | | R\$ | 60,90 |
| PRODUÇÃO POR MISTURA | | | | | 40 |
| CUSTO POR BLOCO | | | | R\$ | 1,52 |

FONTE: A autora (2016). Base: 2014

APÊNDICE 7 – COMPOSIÇÃO DE PREÇO DE BLOCO DE MADEIRA-CIMENTO DE 14 X 19 X 39 MM
(TIPO B)

| Bloco de madeira-cimento | | | | Unid. |
|--------------------------|-------|--------|-----------|-----------|
| Traço de 1:2,2 | | | | |
| MATERIAIS | | | | |
| Material | Unid. | Quant. | Preço | Total |
| Cavaco de madeira #2,36 | kg | 61,50 | R\$ 0,25 | R\$ 15,38 |
| Cimento CP II-Z | kg | 118,00 | R\$ 0,34 | R\$ 40,12 |
| Cal virgem | kg | 9,80 | R\$ 0,30 | R\$ 2,94 |
| Subtotal | | | | R\$ 58,44 |
| MÃO DE OBRA | | | | |
| Mão de obra | Unid. | Quant. | Preço | Total |
| Operário | h | 0,70 | R\$ 17,50 | R\$ 12,25 |
| Subtotal | | | | R\$ 12,25 |
| TOTAL | | | | R\$ 70,69 |
| PRODUÇÃO POR MISTURA | | | | 40 |
| CUSTO POR BLOCO | | | | R\$ 1,77 |

FONTE: A autora (2016). Base: 2014

APÊNDICE 8 – COMPOSIÇÃO DE PREÇO DE BLOCO DE MADEIRA-CIMENTO DE 14 X 19 X 39 MM
(TIPO C)

| Bloco de madeira-cimento | | | | Unid. |
|--------------------------|-------|--------|-----------|-----------|
| Traço de 1:2,2 | | | | |
| MATERIAIS | | | | |
| Material | Unid. | Quant. | Preço | Total |
| Cavaco de madeira #2,36 | kg | 61,50 | R\$ 0,25 | R\$ 15,38 |
| Cimento CP V-ARI | kg | 118,00 | R\$ 0,36 | R\$ 42,48 |
| Cal virgem | kg | 9,80 | R\$ 0,30 | R\$ 2,94 |
| Subtotal | | | | R\$ 60,80 |
| MÃO DE OBRA | | | | |
| Mão de obra | Unid. | Quant. | Preço | Total |
| Operário | h | 0,70 | R\$ 17,50 | R\$ 12,25 |
| Subtotal | | | | R\$ 12,25 |
| TOTAL | | | | R\$ 73,05 |
| PRODUÇÃO POR MISTURA | | | | 40 |
| CUSTO POR BLOCO | | | | R\$ 1,83 |

FONTE: A autora (2016). Base: 2014

APÊNDICE 9 – COMPOSIÇÃO DE PREÇO DE BLOCO DE CIMENTO DE 14 X 19 X 39 MM

| Bloco de vedação | | | | Unid. | |
|-------------------------|-------|--------|-------|-------|-----------|
| 14 x 19 x 39 mm – 3 MPa | | | | | |
| MATERIAIS | | | | | |
| Material | Unid. | Quant. | Preço | | Total |
| Cimento CP V-ARI | kg | 32,00 | R\$ | 0,36 | R\$ 11,52 |
| Areia | kg | 77,00 | R\$ | 0,04 | R\$ 3,39 |
| Areia média | kg | 270,00 | R\$ | 0,04 | R\$ 10,80 |
| Aditivo | l | 0,07 | R\$ | 3,46 | R\$ 0,24 |
| Pedrisco | kg | 52,00 | R\$ | 0,03 | R\$ 1,77 |
| Subtotal | | | | | R\$ 27,72 |
| MÃO DE OBRA | | | | | |
| Mão de obra | Unid. | Quant. | Preço | | Total |
| Operário | h | 0,70 | R\$ | 17,50 | R\$ 12,25 |
| Subtotal | | | | | R\$ 12,25 |
| TOTAL | | | | | R\$ 39,97 |
| PRODUÇÃO POR MISTURA | | | | | 33,4 |
| CUSTO POR BLOCO | | | | | R\$ 1,20 |

FONTE: A autora (2016). Base: 2014